
BACHELORARBEIT

Frau

Dana Quellmalz

**Entwicklung eines Versuchsaufbaues
für ein Maschinenkonzept zur
Lasermarkierung
rotationssymmetrischer Teile**

Mittweida, 2011

BACHELORARBEIT

**Entwicklung eines Versuchsaufbaues für ein
Maschinenkonzept zur
Lasermarkierung
rotationssymmetrischer Teile**

Autor:

Frau

Dana Quellmalz

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT08wL-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Horst Exner

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Steffen Krause

Einreichung:

Mittweida, 23.11.2011

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2011

Bibliografische Beschreibung:

Quellmalz, Dana:

Entwicklung eines Versuchsaufbaues für ein Maschinenkonzept zur Lasermarkierung rotationssymmetrischer Teile. - 2011. - X, 53, A-XVII S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik, Bachelorarbeit, 2011

Referat:

Die Arbeit befasst sich mit der Problematik der Lasermarkierung von rotationssymmetrischen Bauteilen. Ziel war dabei die Entwicklung eines Verfahrens, das hohen Genauigkeitsanforderungen genügt und somit in der Mikrostrukturierung Anwendung finden kann. Als Lösungsansatz wurde der Einsatz einer Schrittmotor-Rotationsachse und deren Synchronisation mit einem Galvanoscanner gefunden. Durch die Überlagerung der Bewegungen dieser Einzelkomponenten können einfache Geometrien (Vektoren, n-Ecke, Kreis) auf Mantelflächen markiert werden. Zur Steigerung der Genauigkeit des Verfahrens ist der Einsatz und die Auswertung eines Winkelmessgerätes an der Rotationsachse nötig.

Inhalt

Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Variablenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	3
2.1 Funktionsweise Scanner	3
2.1.1 Strahlpositionierung.....	3
2.1.2 Galvanometer.....	4
2.1.3 Dielektrische Schichten	6
2.1.4 Fokussierung.....	6
2.2 Schrittmotoren	7
2.2.1 Steuerung.....	7
2.2.2 Aufbau.....	9
2.2.3 Funktionsweise	9
2.2.4 Betriebsarten.....	10
2.3 Stand der Technik	14
2.3.1 Clip-Box-Verfahren.....	14
3 Material und Methoden	15
3.1 Versuchsaufbau	15
3.2 Verfahrensentwicklung	18
3.2.1 Kommunikation zwischen Rotationsachse und Scanner.....	18
3.2.2 Verfahrensablauf	18
3.3 Vorversuch Wartezeit Scanner	19
3.4 Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens.....	20
3.4.1 Positioniergenauigkeit	20
3.4.2 Wiederholgenauigkeit.....	21
3.4.3 Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren	21
3.4.4 Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren	22

4	Ergebnisse	23
4.1	<i>Versuchsaufbau.....</i>	23
4.1.1	Entwurf und Fertigung der Positioniervorrichtung.....	24
4.1.2	Ausrichten der Rotationsachse mit Positioniervorrichtung.....	27
4.2	<i>Verfahrensentwicklung.....</i>	29
4.2.1	Kommunikation zwischen Rotationsachse und Scanner	29
4.2.2	Verfahrensumsetzung	29
4.3	<i>Vorversuch Wartezeit Scanner.....</i>	34
4.4	<i>Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens</i>	35
4.4.1	Positioniergenauigkeit.....	35
4.4.2	Wiederholgenauigkeit.....	36
4.4.3	Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren.....	37
4.4.4	Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren.....	37
5	Diskussion und Auswertung.....	45
5.1	<i>Versuchsaufbau.....</i>	45
5.2	<i>Verfahrensentwicklung.....</i>	45
5.3	<i>Vorversuch Wartezeit Scanner.....</i>	46
5.4	<i>Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens</i>	46
5.4.1	Positioniergenauigkeit.....	46
5.4.2	Wiederholgenauigkeit.....	47
5.4.3	Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren.....	47
5.4.4	Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren.....	47
6	Ausblick.....	49
	Literaturverzeichnis	51
	Anlagen.....	53
	Anhang, Teil 1	A-I
	<i>Zeichnungen der Positioniervorrichtung</i>	<i>A-I</i>
	Anlagen, Teil 2	A-XV
	<i>Skripte zur Markierung von Geometrien.....</i>	<i>A-XV</i>
	Dreiecke.....	A-XV
	N-Ecke.....	A-XX
	Selbstständigkeitserklärung	A-XXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Funktionsweise eines Galvanometerscanners (1).....	3
Abbildung 2: Aufbau eines Galvanometers im Horizontalschnitt und im Querschnitt (2)	4
Abbildung 3: Prinzipdarstellung des „open loop“ Scanners (2)	5
Abbildung 4: Prinzipdarstellung des „closed loop“ Scanners (2)	5
Abbildung 5: Prinzipdarstellung Scanner mit Fokusshift	6
Abbildung 6: Komponenten eines Schrittmotors (4).....	7
Abbildung 7: zeitlicher Verlauf der mechanischen Winkelgeschwindigkeit Ω , des Verdrehwinkels β und der Steuerimpulse (4).....	8
Abbildung 8: Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors (3)	9
Abbildung 9: Schrittfortschaltung bei Vollschrittbetrieb eines Hybrid-Schrittmotors (4)	10
Abbildung 10: zeitlicher Verlauf der Strangströme bei Vollschrittbetrieb (nach einer Abbildung aus (4)).....	11
Abbildung 11: zeitlicher Verlauf der Strangströme bei Halbschrittbetrieb (nach einer Abbildung aus (4)).....	12
Abbildung 12: zeitlicher Verlauf der Strangströme beim Mikroschrittbetrieb mit 120 Schritten pro Umdrehung (nach einer Abbildung aus (4)).....	13
Abbildung 13: Vorschaubild für die Bearbeitung eines rotationssymmetrischen Werkstückes mit Hilfe von Clip-Boxen.....	14
Abbildung 14: Versuchsaufbau.....	15
Abbildung 15: Oberfläche der Software LasPaint	17
Abbildung 16: Skizze Dreieck.....	21
Abbildung 17: Koordinatenbezeichnung im Bearbeitungsraum.....	23

Abbildung 18: Modell der Positioniereinheit für die Rotationsachse	24
Abbildung 19: Abmessungen für die Berechnung von β	25
Abbildung 20: Skizze zur Berechnung von β	26
Abbildung 21: Skizz zur Berechnung von $\Delta\epsilon$	26
Abbildung 22: Positionierhilfe zur Ausrichtung der Rotationsachse gegenüber dem Scanner bezüglich der Verdrehung	27
Abbildung 23: Grobe Positionierung der Achse mit Hilfe eines Anschlagwinkels.....	28
Abbildung 24: Ergebnis der Positionierung mit Pilotlaser	29
Abbildung 25: Zentriwinkel am Beispiel eines regelmäßigen 5-Eckes	32
Abbildung 26: Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelbeschleunigung	34
Abbildung 27: Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelgeschwindigkeit	34
Abbildung 28: Markierungsergebnis zur Positioniergenauigkeit.....	35
Abbildung 29: Markierungsergebnis des Versuches zur Wiederholgenauigkeit bei 500 Umdrehungen	36
Abbildung 30: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Aluminium mit dem Clip-Box-Verfahren.....	38
Abbildung 31: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Aluminium mit dem Superpositionsverfahren	38
Abbildung 32: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Kupfer mit dem Clip-Box-Verfahren	39
Abbildung 33: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Kupfer mit dem Superpositionsverfahren	39
Abbildung 34: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Stahl mit dem Clip-Box-Verfahren.....	40
Abbildung 35: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Stahl mit dem Superpositionsverfahren	40

Abbildung 36: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Aluminium mit dem Clip-Box-Verfahren.....	41
Abbildung 37: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Aluminium mit dem Superpositionsverfahren	41
Abbildung 38: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Kupfer mit dem Clip-Box-Verfahren.....	42
Abbildung 39: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Kupfer mit dem Superpositionsverfahren	42
Abbildung 40: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Stahl mit dem Clip-Box-Verfahren.....	43
Abbildung 41: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Stahl mit dem Superpositionsverfahren	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikation des Lasers (5)	16
Tabelle 2: Spezifikation des Scanners (6)	16
Tabelle 3: Spezifikation der Rotorachse (7).....	16
Tabelle 4: Parameter	22
Tabelle 5: Beschriftungszeiten für die Kreismarkierung.....	37

Variablenverzeichnis

Variable	Einheit	Beschreibung
a	mm	Strahlweg bei Spiegelposition 1
a'	mm	Strahlweg bei Spiegelposition 2
b	mm	Abstand zwischen Drehpunkt der Positioniervorrichtung und Scannfeldrand in positiver X-Richtung, bei Rotation der Achse um die X-Achse
c ₁	1	Korrekturkonstante 1 für die Wartezeit des Scanners in Abhängigkeit von der Winkelbeschleunigung und der Winkelgeschwindigkeit
c ₂	%s	Korrekturkonstante 2 für die Wartezeit des Scanners in Abhängigkeit von der Winkelbeschleunigung und der Winkelgeschwindigkeit
c ₃	s	Korrekturkonstante 3 für die Wartezeit des Scanners in Abhängigkeit von der Winkelbeschleunigung und der Winkelgeschwindigkeit
c _{α1}	%s	erste Konstante der Regressionsfunktion für die Abhängigkeit zwischen der Wartezeit des Scanners und der Winkelbeschleunigung
c _{α2}	s	zweite Konstante der Regressionsfunktion für die Abhängigkeit zwischen der Wartezeit des Scanners und der Winkelbeschleunigung
c _{ω1}	1/°	erste Konstante der Regressionsfunktion für die Abhängigkeit zwischen der Wartezeit des Scanners und der Winkelgeschwindigkeit
c _{ω2}	s	zweite Konstante der Regressionsfunktion für die Abhängigkeit zwischen der Wartezeit des Scanners und der Winkelgeschwindigkeit
D	1	Drehmatrix
d _{Bauteil}	mm	Durchmesser des zu bearbeitenden Bauteils

d_{Strahl}	μm	Strahldurchmesser
l	mm	Abstand zwischen Mittelpunkt des Langlochs und Drehpunkt der Positioniervorrichtung in Y-Richtung, in Nullstellung
$\overrightarrow{MP_n}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Vektor zwischen Mittelpunkt und n-ten Eckpunkt des regelmäßigen N-Eckes
$\overrightarrow{MP_{n+1}}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Vektor zwischen Mittelpunkt und n+1-ten Eckpunkt des regelmäßigen N-Eckes
\vec{m}	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Ortsvektor des Mittelpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
m_s	1	Strangzahl im Stator
N	1	Anzahl der Ecken des regelmäßigen N-Eckes
P	mm	Steigung der Schraube
$\overrightarrow{p_{n+1}}$	$\begin{pmatrix} \text{mm} \\ \text{mm} \end{pmatrix}$	Ortsvektor des n+1-ten Eckpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
q	mm	Weg der bei der Drehung der Rotationsachse um den Winkel φ auf der Mantelfläche zurückgelegt wird
Δq	μm	Positionsabweichung auf der Mantelfläche in y-Richtung
r	mm	Auf X-Y-Ebene projizierter Abstand des Mittelpunktes des Langlochs zum Drehpunkt der Positioniervorrichtung
Δs	mm	maximal zulässige Abweichung des Abstandes zwischen Mittelpunkt des Langloches und dem Drehpunkt der Positioniervorrichtung in Y-Richtung
t_{gesamt}	s	Zeit in der sich die Rotationsachse für die Markierung eines Vektors dreht
t_{markier}	s	Zeit in der die Markierung eines Vektors erfolgt
t_{warte}	s	Wartezeit des Scanners während der Beschleunigung der Rotationsachse
$t_{\text{warte/exp}}$	s	experimentell ermittelte Wartezeit des Scanners während der Beschleunigung der Rotationsachse

$t_{\text{warte/korrigiert}}$	s	korrigierte Wartezeit des Scanners während der Beschleunigung der Rotationsachse
$\overrightarrow{v_{\text{Scanner}}}$	$\begin{pmatrix} \text{mm/s} \\ \text{mm/s} \end{pmatrix}$	Geschwindigkeit des Scanners
$\overrightarrow{v_{\text{radial}}}$	$\begin{pmatrix} \text{mm/s} \\ \text{mm/s} \end{pmatrix}$	Radialgeschwindigkeit auf der Mantelfläche des Bauteils
x	mm	Verschiebung der Linse beim Fokusshift
x_M	mm	X-Koordinate des Mittelpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
x_n	mm	X-Koordinate des n-ten Eckpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
Δx	mm	Abmessung des zu markierenden Vektors in x-Richtung
y_M	mm	Y-Koordinate des Mittelpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
y_n	mm	Y-Koordinate des n-ten Eckpunktes eines regelmäßigen N-Eckes
Δy	mm	Abmessung des zu markierenden Vektors in y-Richtung
z	1	Schrittzahl
Z_P	1	Anzahl der Polpaare
Z_R	1	Anzahl der Rotorzähne
α	°/s ²	Winkelbeschleunigung
β	°	maximale Winkelabweichung beim Ausrichten der Rotationsachse
$\Delta \epsilon$	°	maximale Winkelabweichung beim Verdrehen der Rotationsachse gegenüber der Grundplatte der Positioniervorrichtung
ζ	°	Winkel $\sphericalangle P_n M P_{n+1}$ bei regelmäßigen N-Ecken
η	°	maximale Winkelabweichung beim Drehen der Schraube
φ	°	Winkel um den sich die Rotationsachse gedreht hat
φ_{warte}	°	Zurückgelegter Winkel während der Wartezeit des Scanners

$\Delta\varphi$	1°	Winkelabweichung bei der Drehung der Rotationsachse
ω	°/s	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

In der Lasermarkierung wird häufig mit dem Scanning-Spot-Verfahren gearbeitet. Dabei wird der Laser mittels Galvanometerscanner hochgenau positioniert. Durch verschiedene Verfahren heutzutage das Markieren von planare Flächen eine Standardanwendung. Dies ist in vielen Anwendungsfällen ausreichend.

Es gibt aber auch Applikationen, bei denen das Bauteil keine planare Fläche für die Markierung besitzt. Dies können rotationssymmetrische Bauteile sein, wie zum Beispiel Ventile, Schäfte von Fräsern oder Kurbelwellen. Würde man diese Bauteile mit dem oben benannten Verfahren bearbeiten, so käme es aufgrund der Wölbung zu Verzerrungen. Außerdem kann so nicht auf der kompletten Mantelfläche markiert werden.

Um solche Werkstücke sauber zu markieren, ist es erforderlich eine Rotationsachse zum Drehen des Werkstückes einzusetzen und in das Maschinenkonzept einzubinden. Bei der Ansteuerung des Systems ist zu beachten, dass die Bewegung der Achse auf die Bewegung des Scanners abgestimmt werden muss.

Ziel dieser Arbeit war es ein Verfahren zu entwickeln, bei dem während der gesamten Markierung von rotationssymmetrischen Bauteilen der Fokus auf der Bauteiloberfläche liegt. Um dieses zu testen, sollte ein bestehender Handarbeitsplatz der Laserklasse 4 weiterentwickelt werden. Der Test sollte an verschiedenen metallischen Werkstücken durchgeführt werden um das Verfahren hinsichtlich Genauigkeit, Bearbeitungszeit und Qualität der Strukturen zu bewerten.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden der grundlegende Aufbau, sowie die Funktionsweise der beiden wichtigsten Elemente des Versuchsaufbaus beschrieben. Außerdem wird auf bisher bekannte Verfahren zur Beschriftung rotationssymmetrischer Teile eingegangen.

2.1 Funktionsweise Scanner

In der Lasertechnik werden Scanner zur Strahlführung verwendet. Die Ablenkung des Strahles erfolgt dabei mit Hilfe von mindestens einem Spiegel. Die Spiegel sind jeweils über eine Welle mit einem Galvanometer verbunden.

2.1.1 Strahlpositionierung

Die Strahlpositionierung erfolgt durch verschiedene Winkeleinstellungen der Spiegel. Die Spiegel sind dabei jeweils über eine Welle mit einem Galvanometer verbunden, welches die Winkeleinstellung realisiert. Jeder Winkel entspricht einer bestimmten Achsposition. Wie in Abbildung 1 gezeigt realisiert dabei der eine Spiegel die Ablenkung in X-Richtung und der andere Spiegel die Ablenkung in Y-Richtung.

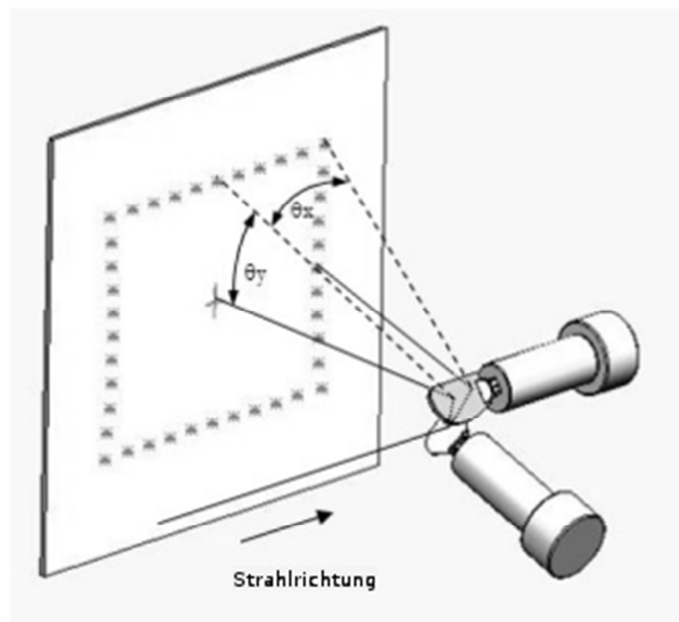


Abbildung 1: Schematische Funktionsweise eines Galvanometerscanners (1)

Um ein größtmögliches Bearbeitungsfeld zu erreichen, müssen die beiden Spiegel senkrecht zueinander ausgerichtet sein. Außerdem muss man bei der Spiegeljustage beachten, dass der erste Spiegel genau in der Mitte vom Strahl getroffen wird. Wenn dies nicht beachtet wird, so wandert der Strahl über die Spiegeloberfläche des zweiten Spiegels. Die genaue Positionierung des Strahles auf dem Bearbeitungsfeld ist somit unmöglich.

2.1.2 Galvanometer

Wie bereits erwähnt erfolgt die Positionierung der Spiegel mit Hilfe eines Galvanometers. Die Funktionsweise eines solchen Galvanometers ist der Funktionsweise eines Elektromotors ähnlich. Der Rotor besteht dabei aus einem Permanentmagneten oder einem weichmagnetischem Material. Da sich der Spiegel mehrere tausend Mal pro Sekunde bewegt, ist es technisch nicht sinnvoll die Spule am Rotor anzubringen, weil die Stromversorgung der Spulen nicht über längere Zeit gewährleistet werden könnte. In Abbildung 2 ist der Aufbau eines Galvanometers, welches für Scanner genutzt wird, gezeigt.

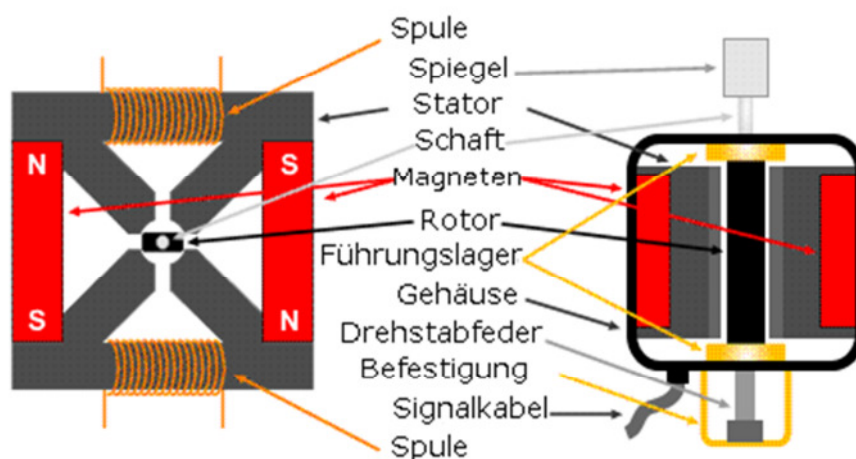


Abbildung 2: Aufbau eines Galvanometers im Horizontalschnitt und im Querschnitt (2)

Durch die beiden Permanentmagneten am Stator entsteht an den Polspitzen des Stators ein starkes Magnetfeld. Je nachdem, wie die Spulen das Magnetfeld beeinflussen, richtet sich der Rotor, welcher über einen Schaft mit dem Spiegel verbunden ist, neu aus.

Der Rotor befindet sich außerdem an einer Drehstabfeder, die ihn wieder in die Nullposition zurückbringt, sobald durch die Spulen kein Strom mehr fließt.

Galvanometer werden in zwei Gruppen nach ihrer Ansteuerung eingeteilt. Man unterscheidet zwischen „open loop“ und „closed loop“ Scanner.

Bei einem „open loop“ Scanner wird der Galvanometer je nach Polarität der Spannung in die eine oder andere Richtung ausgelenkt. Die Rotorposition ist so gut einstellbar, sie

kann jedoch, wie es in Abbildung 3 zu erkennen ist, nicht genau überprüft werden, da kein geschlossener Regelkreis vorhanden ist.

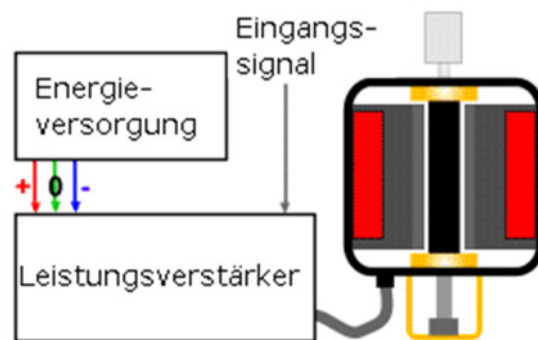


Abbildung 3: Prinzipdarstellung des „open loop“ Scanners (2)

Das ist dagegen bei einem „closed loop“ Scanner möglich. Der Regelkreis eines solchen Scanners ist in Abbildung 4 dargestellt.

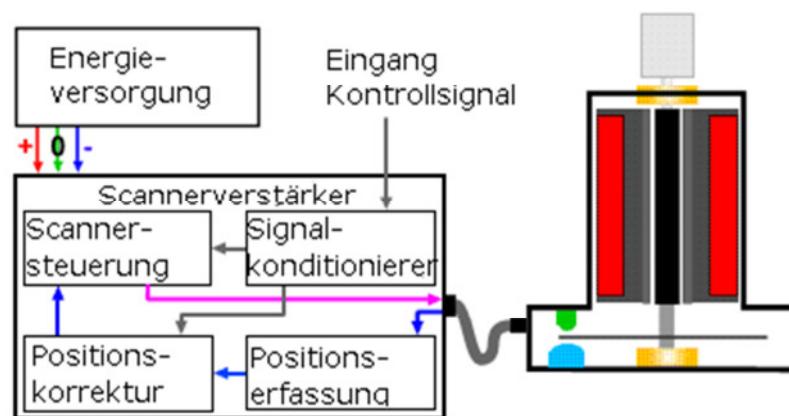


Abbildung 4: Prinzipdarstellung des „closed loop“ Scanners (2)

Bei „closed loop“ Scannern wird das Eingangssignal zunächst über einen Signalkonditionierer zur Scannersteuerung geleitet. Daraufhin wird die Rotorstellung optisch mit einer Photodiode oder kapazitiv ermittelt. Das Sensorsignal wird an die Positionserfassung übertragen, welche daraus ein Positionssignal ermittelt und es an die Positionskorrektur übergibt. An dieser Stelle findet ein Vergleich zwischen Soll- und Ist-Position statt. Liegt der Istwert nicht innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes um den Sollwert, dem Positionierband, so wird mit Hilfe eines PID-Reglers ein Scannerkorrektursignal ermittelt. Das Signal wird dann an die Scannersteuerung übertragen. Dort wird aus Scannerkorrektursignal und Eingangssignal die Spannung zur Ansteuerung der Magnetspule ermittelt, die zur Korrektur der Position des Galvanometers nötig ist.

Dadurch ist eine Korrektur der Position des Galvanometers in Echtzeit möglich. (2)

2.1.3 Dielektrische Schichten

Die Spiegel weisen ein spezielles Schichtsystem aus dielektrischen Schichten mit abwechselnd hohen und niedrigen Brechungsindex auf. Die Schichtdicke entspricht dabei der Hälfte der zu reflektierenden Wellenlänge. Durch den Übergang von Schichten mit hohem Brechungsindex zu Schichten mit niedrigem Brechungsindex wird ein Teil der Strahlung reflektiert. Die reflektierte Strahlung interferiert und es kommt zur Verstärkung der elektromagnetischen Wellen. Somit kann für einen bestimmten Wellenlängenbereich ein Reflexionsgrad von nahezu 100 % erreicht werden.

2.1.4 Fokussierung

Um den Strahl auf der Bearbeitungsfläche zu fokussieren gibt es zwei Methoden. Die eine Variante ist die Fokussierung mittels eines Fokusshifts. Die andere Methode nutzt eine Planfeldoptik.

Bei dem Fokusshift wird der Strahl vor dem Scanner fokussiert. Das vereinfacht in Abbildung 5 dargestellt. Der Spiegel symbolisiert dabei den Scanner.

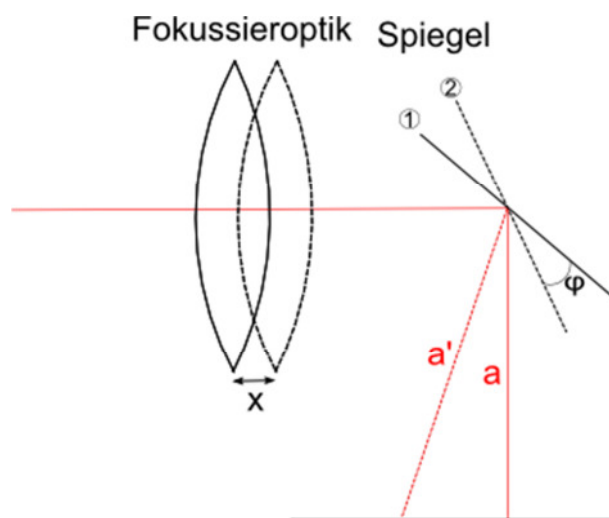


Abbildung 5: Prinzipdarstellung Scanner mit Fokusshift

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, bewirkt eine Änderung der Spiegelposition um φ_{Spiegel} auch eine Änderung der Länge des Strahlweges. Die Änderung des Strahlweges muss durch eine Positionsverschiebung der Fokussieroptik ausgeglichen werden. Dabei ergibt sich die Positionsänderung x aus der Differenz des Strahlweges in Spiegelposition 2 und dem Strahlweg in Spiegelposition 1 (Formel (1)).

$$x = a' - a \quad (1)$$

Durch die Positionsänderung der Fokussieroptik ist es bei dieser Variante auch möglich gewölbte Oberflächen zu bearbeiten. Jedoch besitzt der Fokusschift gegenüber der Planfeldoptik einen erhöhten steuerungstechnischen Aufwand und wird somit seltener eingesetzt.

Weitaus öfter hingegen wird der Strahl erst nach dem Scanner mit Hilfe einer Planfeldoptik fokussiert. Diese speziell geformten Linsen oder Linsensysteme besitzen einen Fokusabstand, der von dem jeweiligen Auftreffwinkel und dem Auftreffort des Strahles auf die Fokussiereinheit abhängig ist. Somit können Abbildungsfehler minimiert und ein planares Fokusfeld erzeugt werden.

2.2 Schrittmotoren

Schrittmotoren sind eine spezielle Bauform von Synchronmaschinen, die ausgeprägte Statorpole besitzen. Ihre charakteristische Eigenschaft ist die schrittweise Drehung des Rotors um einen bestimmten Schrittwinkel α , der durch das sprunghafte Weiterschalten des Magnetfeldes verursacht wird. Eine volle Umdrehung besteht somit aus einer genau definierten ganzzahligen Anzahl von Einzelschritten, deren Anzahl ist von der Motorbauart abhängig. (3)

2.2.1 Steuerung

In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass jeder Schrittmotor aus dem Schrittmotor selbst und einer Ansteuerung besteht, welche sich aus der Logik und dem Leistungselektronik-Stellglied zusammensetzt.



Abbildung 6: Komponenten eines Schrittmotors (4)

Aus den Eingangsinformationen berechnet die Logik die Impulsfolge zur Ansteuerung der Leistungselektronik. Diese wiederum versorgt die einzelnen Wicklungsstränge mit Strom. Der zeitliche Verlauf der Steuerimpulse und der daraus folgende Verdrehwinkel, sowie die entsprechenden mechanischen Winkelgeschwindigkeiten sind in Abbildung 7 bei niedriger Schrittfrequenz F_z dargestellt.

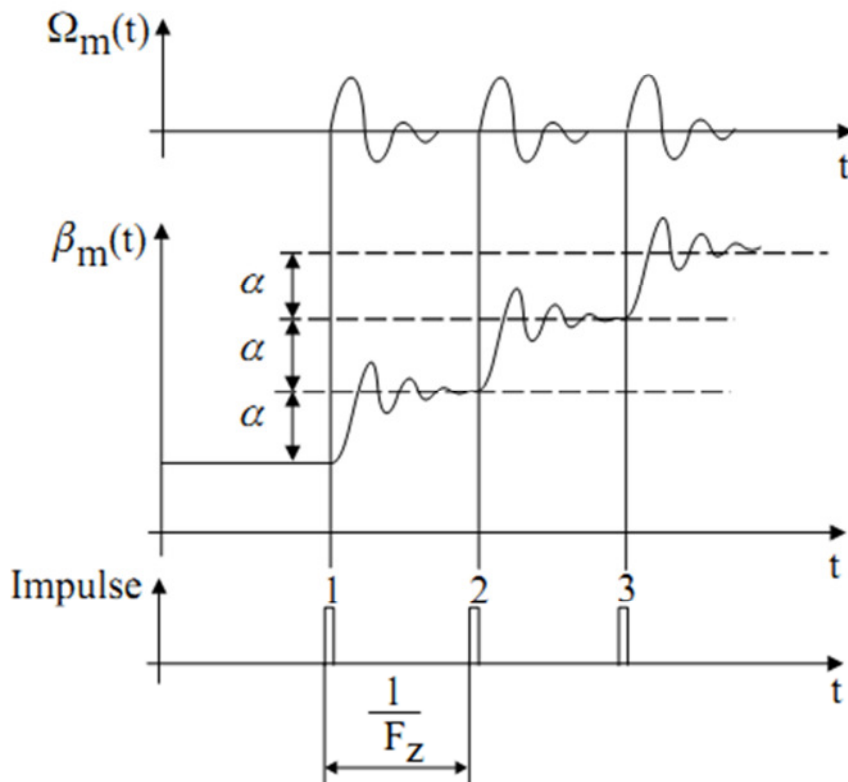


Abbildung 7: zeitlicher Verlauf der mechanischen Winkelgeschwindigkeit Ω , des Verdrehwinkels β und der Steuerimpulse (4)

In Abbildung 7 erkennt man weiterhin, dass jeder Steuerimpuls eine Weiterschaltung des Winkels um den Schrittwinkel α bewirkt, dem der Rotor des Schrittmotors mit einer geringen Verzögerung folgt. Nach kurzem Einschwingen verharrt der Rotor dann solange in dieser Position, bis ein neuer Steuerimpuls eintrifft. Die neue Position des Rotors unterscheidet sich von der vorhergehenden genau um den Schrittwinkel α . Der Betrag des Schrittwinkels wird durch die Bauform des Schrittmotors bestimmt.

Um einen gewünschten Positioniervorgang auszuführen, werden diese diskreten Einzelschritte aneinandergereiht. Der dabei zurückgelegte Gesamtwinkel kann bei störungsfreiem Betrieb und unter Vernachlässigung des Schrittfehlers nur ein ganzzahliges Vielfaches des Schrittwinkels sein.

Mit einem Schrittmotor ist es somit möglich eine diskrete Positionierung in einem offenen Regelkreis, das heißt ohne dass die aktuelle Rotorposition zurückgegeben wird, auszuführen. (4)

2.2.2 Aufbau

Grundsätzlich unterscheidet man den Aufbau von Schrittmotoren in drei Grundtypen. Diese sind der Reluktanzschrittmotor, der permanenterrregte Schrittmotor und der Hybrid-Schrittmotor.

Im Folgenden soll nur auf den Hybrid-Schrittmotor eingegangen werden, weil ein Hybridschrittmotor für die Arbeit verwendet wurde.

Der Hybridschrittmotor vereint den Vorteil der kleinen Schrittwinkel des Reluktanzschrittmotors mit den großen Drehmomenten und dem Selbsthaltemoment des permanenterrregten Schrittmotors.

Bei diesem Schrittmotor besteht der Rotor aus einem axial angeordneten Permanentmagneten, welcher sich, wie in Abbildung 8 gezeigt, zwischen zwei weichmagnetischen Zahnscheiben befindet. Die Zahnscheiben sind gegeneinander um eine halbe Zahnteilung versetzt. Durch die axiale Anordnung des Permanentmagneten bildet die eine Zahnscheibe den Nordpol und die andere den Südpol des Rotors.

Die einzeln ansteuerbaren Wicklungen befinden sich im Stator. (3)

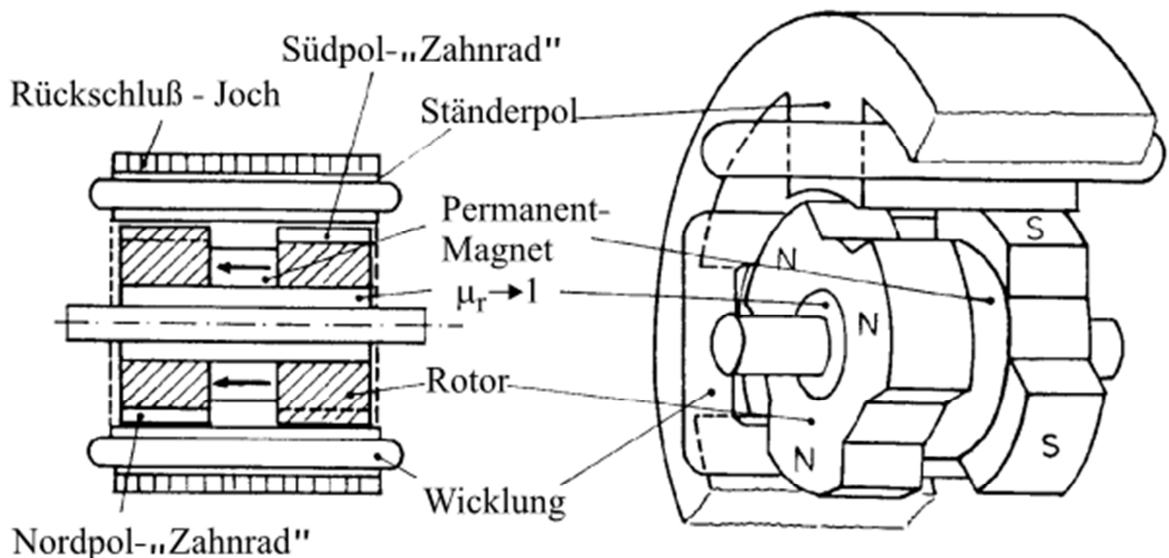


Abbildung 8: Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors (3)

2.2.3 Funktionsweise

Bei einem Hybrid-Schrittmotor richten sich, abhängig davon, welcher Strang stromdurchflossen ist, die Rotorzähne zu den entsprechenden Statorzähnen aus. Dieses Prinzip ist in Abbildung 9 am Beispiel einer vereinfachten Darstellung des Motoraufbaus im Vollschrittbetrieb gezeigt. Dabei ist die Anzahl der stromdurchflossenen Stränge immer eins.

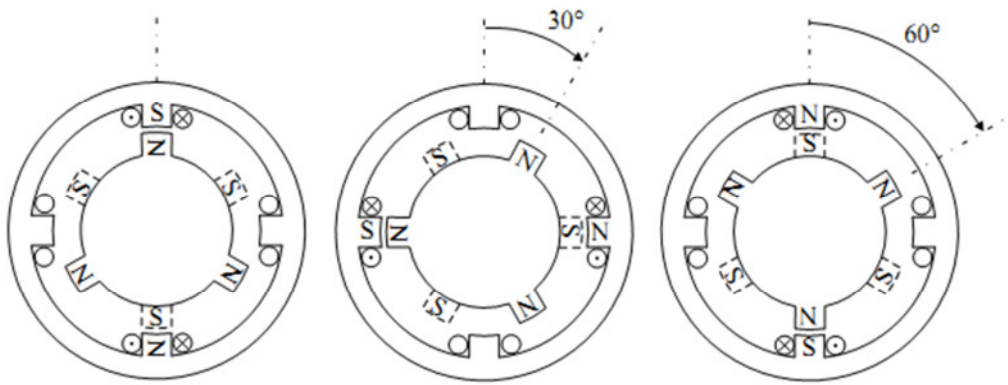


Abbildung 9: Schrittfortschaltung bei Vollschrittbetrieb eines Hybrid-Schrittmotors (4)

Wird das Statormagnetfeld um einen elektrischen Fortschrittswinkel von 90° weitergeschaltet, so folgt auf Grund des Verhältnisses zwischen Statorzähnen und Rotorzähnen der Stator nur mit einem Schrittwinkel von 30° .

Die Anzahl der Schritte z für eine Umdrehung berechnet sich dabei gemäß Formel (2).

$$z = Z_R \cdot m_s = 2 \cdot Z_p \cdot m_s \quad (2)$$

Dabei entspricht Z_R der Anzahl der Rotorzähne, m_s der Strangzahl im Stator und Z_p der Polpaarzahl.

Für den in Abbildung 9 dargestellten Hybrid-Schrittmotor ergeben sich somit für den Vollschrittbetrieb 12 Einzelschritte von je 30° . (4)

2.2.4 Betriebsarten

Außer dem in 2.2.3 erwähntem Vollschrittbetrieb gibt es noch den Halbschrittbetrieb und den Mikroschrittbetrieb.

Im Folgenden werden diese drei Betriebsarten am Beispiel des in Abbildung 9 dargestellten Hybridmotors erklärt.

2.2.4.1 Vollschrittbetrieb

Das Strommagnetfeld wird bei jedem Schritt um einen elektrischen Fortschrittswinkel von 90° weitergeschaltet (Abbildung 9). Dabei bleibt bei jedem einzelnen Schrittingintervall die Anzahl der simultanen stromdurchflossenen Stränge konstant. In Abbildung 11 wird der zeitliche Verlauf der beiden Strangströme des Hybrid-Schrittmotors für eine Rotation um 120° dargestellt. Ab einem Rotationswinkel von 120° wiederholt sich der Verlauf der Strangströme.

Um den Fortschrittswinkel zu verkleinern, und damit auch kleinere Schrittwinkel zu erreichen, muss die Strangzahl erhöht werden. Dies führt aber auch zu einem erhöhten Schaltungsaufwand. Dadurch sind dieser Maßnahme wirtschaftliche Grenzen gesetzt. (4)

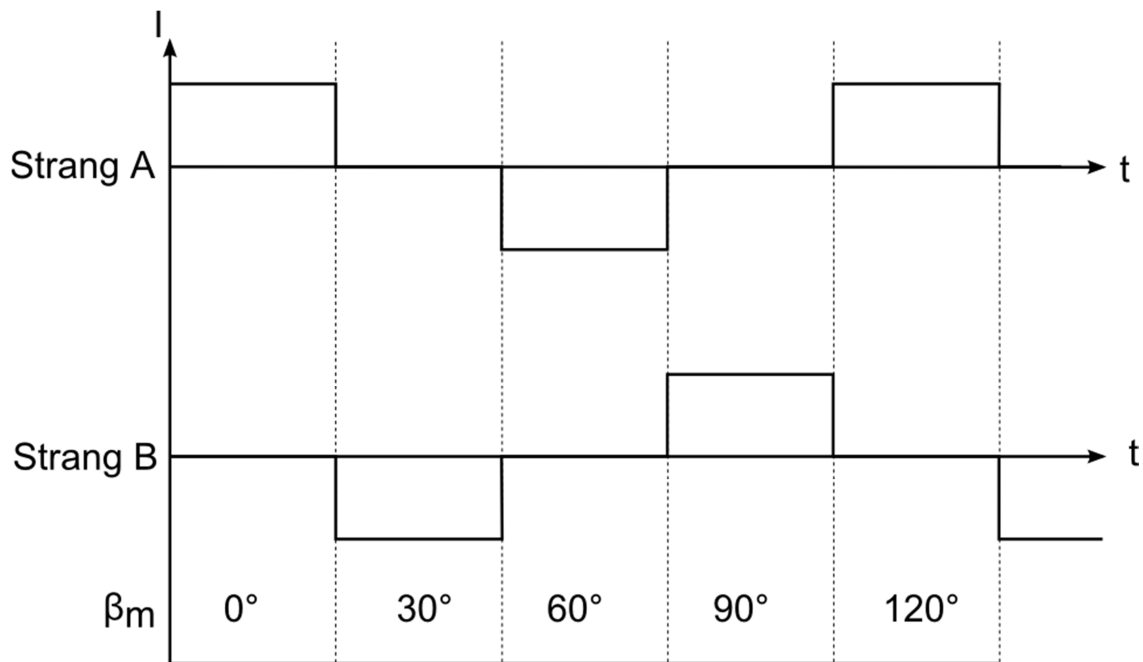


Abbildung 10: zeitlicher Verlauf der Strangströme bei Vollschrittbetrieb (nach einer Abbildung aus (4))

2.2.4.2 Halbschrittbetrieb

Eine weitere Möglichkeit den Fortschaltwinkel zu minimieren bietet der Halbschrittbetrieb. Bei dieser Betriebsart beträgt der Fortschaltwinkel 45° . Dadurch halbiert sich der Schrittwinkel, ohne dass die Strangzahl erhöht werden muss. Auch der zeitliche Verlauf dieser beiden Strangströme ist in Abbildung 10 dargestellt. Im Gegensatz zum Vollschrittbetrieb variiert bei dieser Betriebsart die Anzahl der stromdurchflossenen Stränge. Dies führt bei einem konstanten Strombetrag zu einem Schwanken der Amplitude des Strommagnetfeldes. Dadurch kommt es zu Störungen in der Laufruhe des Motors. Um dies zu vermeiden muss der Stromstärkebetrag an die Anzahl der stromdurchflossenen Stränge angepasst werden. (4)

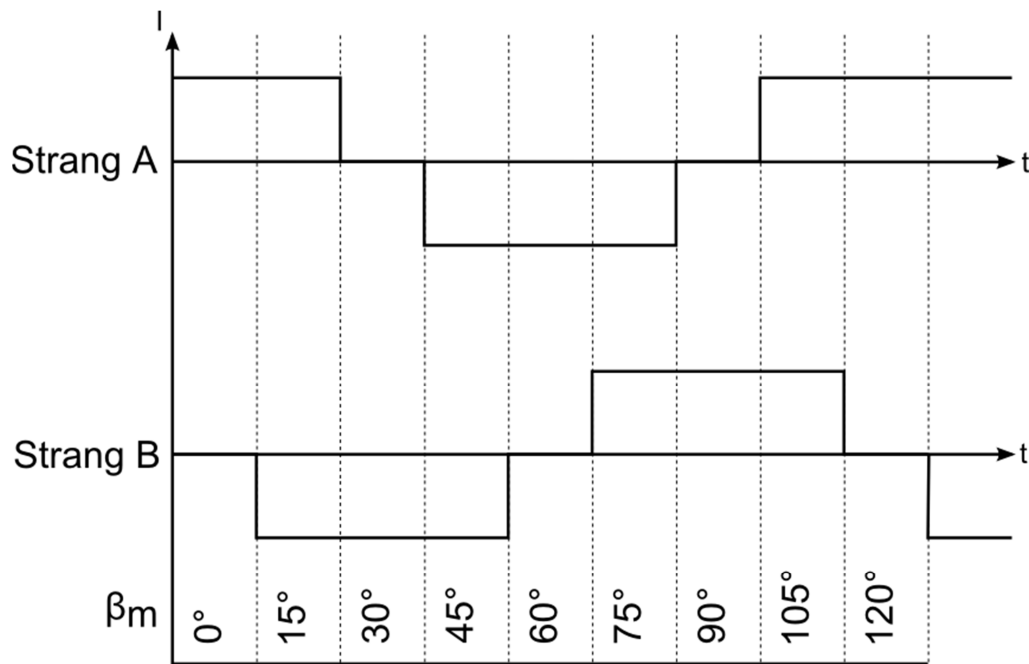


Abbildung 11: zeitlicher Verlauf der Strangströme bei Halbschrittbetrieb (nach einer Abbildung aus (4))

2.2.4.3 Mikroschrittbetrieb

In den bisherigen Verfahren wurde angenommen, dass die Ströme Gleichströme mit konstantem Betrag der Stromstärke sind. Mit entsprechender leistungselektronischer Ansteuerungstechnik können aber auch Stromzwischenwerte eingestellt werden. Dadurch sind elektrische Fortschaltwinkel von weniger als 45° möglich. Diese Betriebsart wird als Mikroschrittbetrieb bezeichnet. Durch die kleineren Fortschaltwinkel können auch kleinere Schrittwinkel erreicht werden. Der Verlauf der Strangströme beim Mikroschrittbetrieb für 120 Schritte pro Umdrehung ist in Abbildung 12 gezeigt. Dennoch kann die Schrittzahl nur begrenzt erhöht werden. Eine Ursache dafür ist, dass der relative Schrittfehler mit Steigerung der Schrittzahl zunimmt. Außerdem kann bei geringen Schrittwinkeln die Haftreibung nicht mehr überwunden werden. Gegenüber den beiden anderen Betriebsarten hat der Mikroschrittbetrieb einerseits den Vorteil kleinerer Schrittwinkel und andererseits wird die Laufruhe des Motors gesteigert. (4)

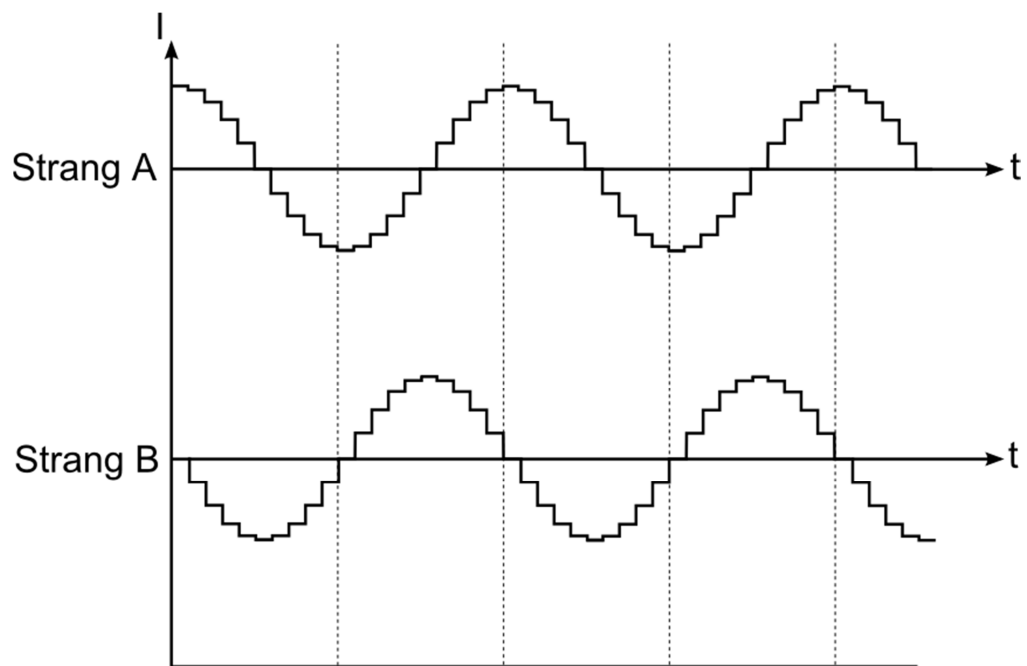


Abbildung 12: zeitlicher Verlauf der Strangströme beim Mikroschrittbetrieb mit 120 Schritten pro Umdrehung (nach einer Abbildung aus (4))

2.3 Stand der Technik

Um rotationssymmetrische Teile zu beschriften, wurden bereits verschiedene Verfahren entwickelt.

2.3.1 Clip-Box-Verfahren

Eines dieser Verfahren ist das Zerlegen der aufzubringenden Grafik in kleine gleichgroße Teilabschnitte, wie es in Abbildung 13 rot dargestellt ist. Die Breite der Teilabschnitte kann je nach Anwendung individuell gewählt werden.

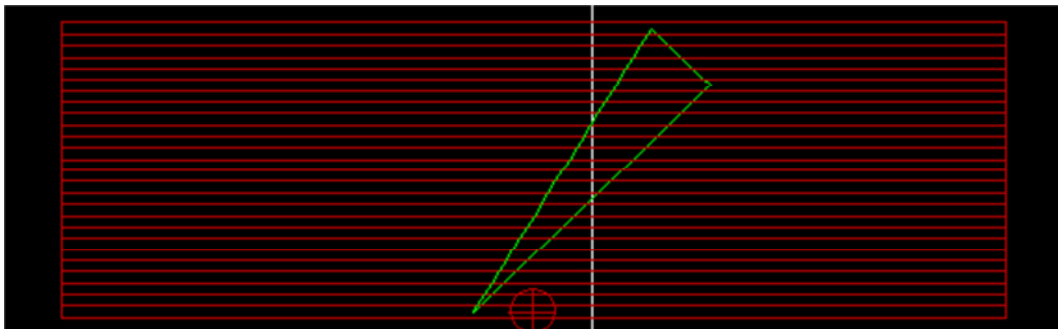


Abbildung 13: Vorschaubild für die Bearbeitung eines rotationssymmetrischen Werkstückes mit Hilfe von Clip-Boxen

Bei diesem Verfahren wird das Scannfeld auf die Größe eines solchen Teilabschnittes verkleinert und als Clip-Box bezeichnet. Virtuell wird nun die Grafik unter der Clip-Box immer so weit verschoben, dass genau einer dieser Teilbereiche im verkleinertem Scannfeld liegt. Gleichzeitig wird dementsprechend die Rotationsachse gedreht. Danach wird dieser Teilbereich markiert, ohne dass sich dabei die Rotationsachse bewegt. Ist der Laserprozess für diesen Teilbereich abgeschlossen, wird die Achse und virtuell die Grafik weiterbewegt, so dass der nächste Teilbereich markiert werden kann.

Zwar ist dieses Verfahren vor allem bei komplexeren Grafiken im Vergleich zu anderen Verfahren mit Rotationsachsen schnell, doch da bei Verwendung einer Planfeldoptik nicht die ganze Zeit im Fokus gearbeitet wird, kommt es zu Verzerrungen. Nutzt man dagegen einen Scanner mit Fokusshift, so kann die Wölbung des Bauteiles mit berücksichtigt werden und es kann die ganze Zeit eine Bearbeitung im Fokus erfolgen.

Außerdem sind nach der Bearbeitung auf dem Werkstück Ansätze an den jeweiligen Grenzen der Teilbereiche zu erkennen. Diese entstehen durch das virtuelle Zerlegen der Grafik und das anschließende Zusammenfügen der Markierung im Bearbeitungsprozess.

Dadurch ist dieses Verfahren nicht für die Mikrostrukturierung nutzbar.

3 Material und Methoden

Für die Mikrobearbeitung sollte eine Methode gefunden werden, mit der man das Clip-Box-Verfahren umgehen konnte. Mit Hilfe der neuen Methode sollte es möglich sein, dass die gesamte Markierung eines rotationssymmetrischen Bauteils im Fokus erfolgt. Im Gegensatz zum Clip-Box-Verfahren sollten die Vektoren im Ganzen markiert werden, um Ansätze zu vermeiden.

3.1 Versuchsaufbau

Zum Testen des entwickelten Verfahrens stand ein Handarbeitsplatz der Laserklasse 4 zur Verfügung (Abbildung 14).

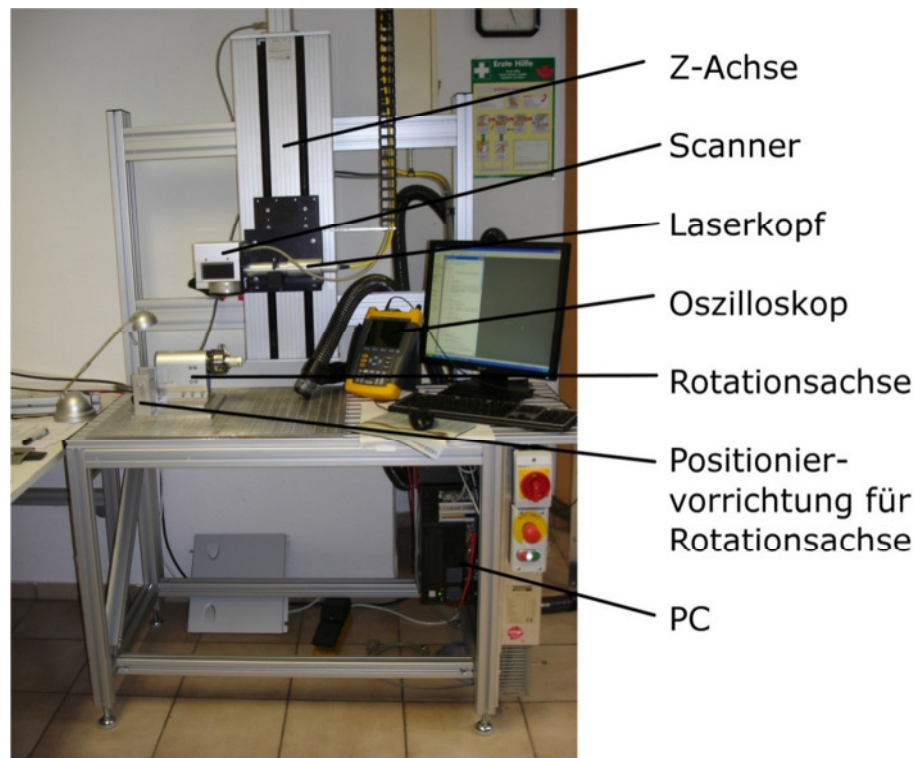


Abbildung 14: Versuchsaufbau

Als Laser kam dabei ein Faserlaser der Firma IPG Laser GmbH (Burbach) mit einer maximalen Ausgangsleistung von 50 W zum Einsatz. Weitere Daten können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Spezifikation des Lasers (5)

Bezeichnung	YLP-1-120-50-50-HC
Seriennummer	10094436
Betriebsart	gepulst
Emissionswellenlänge	1064 nm
mittlere Leistung	50 W
Pulsdauer	100 ns - 140 ns
Frequenz	50 kHz – 500 kHz
Pulsenergie	1 mJ
Strahlqualität (M ²)	<1,5

Zur Realisierung der Bewegung des Laserstrahls wurde ein Scanner der Firma Scanlab AG (Puchheim) genutzt, dessen Spezifikation in Tabelle 2 dargestellt ist. Die Daten beziehen sich dabei auf eine Bearbeitung im Fokus bei Verwendung einer Optik mit der Brennweite 160 mm.

Tabelle 2: Spezifikation des Scanners (6)

Bezeichnung	SCANcube10
Seriennummer	320451
Apertur	10 mm
typ. Markspeed	2 m/s
typ. Jumpspeed	10 m/s
Schleppverzug	160 µs

Für die Rotation des Werkstückes stand eine Drehachse der Firma isel Germany AG (Dernbach) zur Verfügung. Die Spezifikation der Achse bei Halbschrittbetrieb ist der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Spezifikation der Rotorachse (7)

Bezeichnung	Minidrehachse MD1
Umsetzverhältnis	1:20
Abtriebsdrehzahl	0 – 60 min ⁻¹
Betriebsmoment	8 Nm
Nennhaltemoment	14 Nm
minimale Schrittweite	3,5 arcmin
Maximale Transprtlast (Drehung um horizontale Achse) (8)	2,5 kg

Die Achse wurde so angebracht, dass mit ihr die Markierung in Y-Richtung und mit dem Scanner die Markierung in X-Richtung erfolgt.

Zur Steuerung der Achsen wurden Achscontroller der Firma Nanotec Electronic GmbH & Co. KG (Feldkirchen) verwendet. Die Ansteuerung des Scanners und die Ansteuerung des Lasers erfolgte über die Interfacekarte RTC4 der Firma Scanlab AG und einem PC.

Um die Lage des Fokus zum Werkstück einstellen zu können, war am Versuchstand eine Z-Achse ebenfalls von der Firma isel Germany AG angebracht.

Da die Relativbewegung zwischen Bauteil und Laserstrahl sowohl mit dem Scanner als auch mit der Drehachse realisiert werden sollte, musste die Rotationsachse gegenüber dem Scanner ausgerichtet werden. Dafür wurde eine Positioniervorrichtung entworfen und eingesetzt.

Zur Synchronisation zwischen Scanner und Rotationsachse war es notwendig, dass ein Signalaustausch zwischen den beiden Komponenten erfolgte. Das Signal wurde mit Hilfe eines tragbaren Oszilloskops der Firma Fluke Deutschland GmbH (Glottartal) beobachtet.

Zur Bedienung des Versuchsstandes wurde die firmeneigene Beschriftungssoftware LasPaint genutzt.

Mit Hilfe der Software lassen sich Skripte in einer an Basic angelehnten Programmiersprache erstellen und ausführen. Zur Steuerung des Programmablaufes ist es möglich Schleifen, bedingte Ausführungen und Subroutinen zu programmieren. Die im Skript erstellten Markierungen können für ebene Flächen und das Clip-Box-Verfahren in einem Vorschauenfenster angezeigt werden. In Abbildung 15 ist die Oberfläche des LasPaint mit Skript und Vorschauenfenster dargestellt. Bei der Ausführung der Skripte erfolgt eine direkte Kommunikation zwischen Software und RTC sowie zwischen der Software und den Achscontrollern. RTC, Achsen und Laser können im Setup konfiguriert werden. In der Software ist es ebenfalls möglich die genutzte Optik einzustellen.

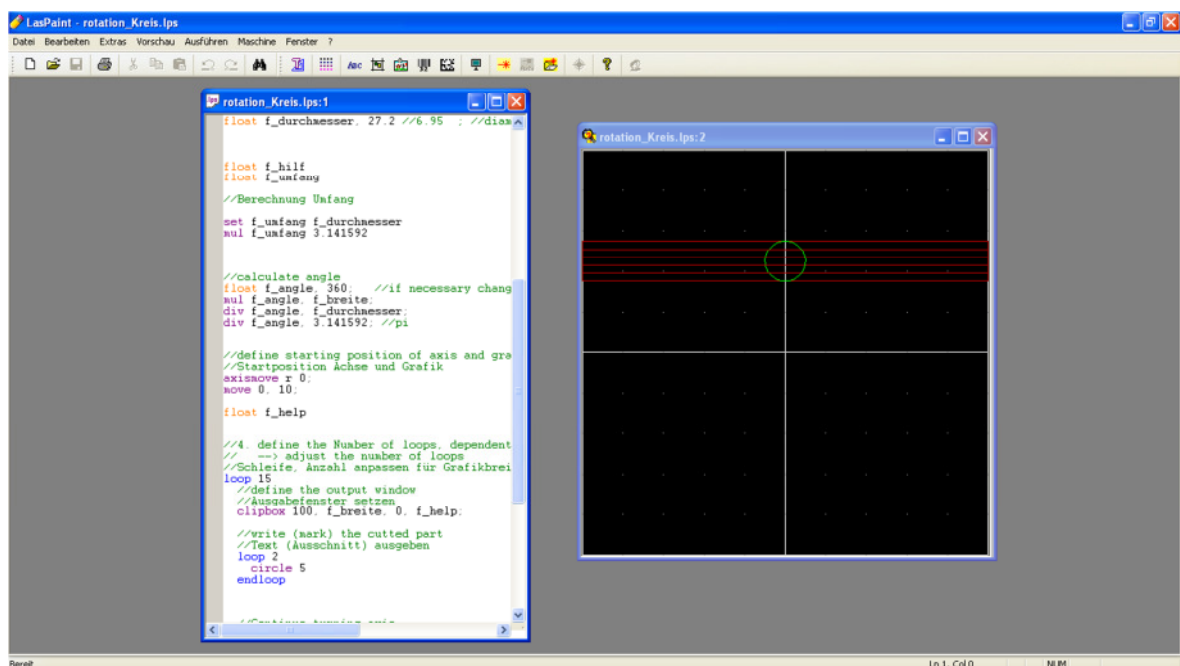


Abbildung 15: Oberfläche der Software LasPaint

3.2 Verfahrensentwicklung

3.2.1 Kommunikation zwischen Rotationsachse und Scanner

Um eine Kommunikation zwischen der Rotationsachse und dem Scanner zu realisieren war mindestens ein Signal notwendig, welches von der Steuerung eines der beiden Elemente ausgeht und zur Ansteuerung des anderen Elementes genutzt werden konnte.

Die Rotationsachse ist träger als der Scanner und kann nicht so schnell ausgleichende Bewegungen ausführen wie der Scanner. Aus diesem Grund sollte der Scanner auf das Signal der Rotationsachse reagieren.

Auf der RTC befinden sich ein Start-Eingang, der einen externen Start des Programmablaufes ermöglicht und ein Stop-Eingang, der ein externes Beenden des Programmablaufes bewirkt. Weitere Eingänge müssen mit einem Befehl ausgelesen werden, sie reagieren somit nicht unmittelbar auf eine Signalfanke. (9)

Der Achscontroller besitzt drei open-collector-Ausgänge, die jeweils ein Statussignal ausgeben. Den Ausgängen kann das Statussignal „Fahrend“ oder „Bereit“ zugeordnet werden. Das Statussignal „Fahrend“ steht auf HIGH wenn die Achse fährt und auf LOW wenn die Achse sich nicht bewegt. „Bereit“ ist das zu „Fahrend“ invertierte Signal. (10)

Ein Positionssignal, wie es bei Achsen mit Encodern oder anderen Winkelmesssystemen ausgegeben wird, war bei dieser Achse nicht vorhanden.

3.2.2 Verfahrensablauf

Zum Aufbringen von Vektoren, Strukturen oder einfachen geometrischen Figuren auf das Werkstück müssen die Geschwindigkeit der Rotationsachse und des Scanners aufeinander abgestimmt werden. Da bei einer beschleunigten Bewegung sich die Geschwindigkeiten ständig ändern, muss ständig ein Abgleich zwischen der Geschwindigkeit der Rotationsachse und der Geschwindigkeit des Scanners erfolgen. Die beschleunigte Bewegung kann aber nicht erfasst werden, weil kein Positionssignal vorhanden ist. Die Markierung muss somit bei konstanter Drehzahl erfolgen.

Auf dieser Grundlage wurden Berechnungen durchgeführt und ein Skript zur Markierung erstellt.

3.3 Vorversuch Wartezeit Scanner

Damit bei konstanter Drehzahl gearbeitet werden kann, muss eine Wartezeit eingefügt werden, in der die Achse beschleunigt wird. Es ist bekannt, dass die Beschleunigung der Rotationsachse ab einer bestimmten Startgeschwindigkeit konstant ist. Die Startgeschwindigkeit ist aber nicht bekannt und konnte nicht ermittelt werden.

Darum wurde als Näherung die gesamte Beschleunigung als konstant betrachtet. Mit Hilfe dieser Annahme konnte ein Beschleunigungswinkel (Formel (4)) und eine Beschleunigungszeit (Formel (3)) berechnet werden.

$$t_{\text{warte}} = \frac{2\omega}{\alpha} \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{warte}} = \frac{\alpha}{2} t_{\text{warte}}^2 = \frac{2\omega^2}{\alpha} \quad (4)$$

Es wurde festgestellt, dass in der Wartezeit ein größerer Winkel als der berechnete zurückgelegt wurde. Aus diesem Grund musste eine Korrektur vorgenommen werden.

Da die Winkel nur in Form des Gesamtdrehwinkels vorgegeben werden konnten, wurde eine Korrekturfunktion für die Wartezeit ermittelt, in der die Achse den berechneten Winkel (Formel (4)) zurücklegte.

Dazu wurden Vektoren auf einem Werkstück mit dem Durchmesser 39,8 mm aufgebracht, die entlang des Umfanges eine Abmessung von 5 mm hatten. Im entwickelten Skript wurde der Gesamtwinkel für die Markierung dieses Vektors berechnet. Dabei wurde für den Beschleunigungs- und für den Bremswinkel jeweils der in Formel (4) berechnete Winkel angenommen. Damit die Markierung des Vektors bei konstanter Drehzahl erfolgt, wurde zunächst die berechnete Wartezeit im Skript genutzt.

Während der Markierung wurde mit Hilfe eines Oszilloskops das Statussignal der Achse aufgenommen und die HIGH-Zeit ermittelt. Der Versuch wurde mit sechs verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten und fünf verschiedenen Winkelbeschleunigungen durchgeführt. Dabei variierte die Winkelgeschwindigkeit zwischen 60 %/s und 360 %/s in Schritten von 60 %/s. Für die Winkelbeschleunigung wurden Werte zwischen 90 %/s² und 900 %/s² gewählt. Ab einem Wert von 300 %/s² wurde die Winkelbeschleunigung in Schritten von 200 %/s² verändert.

Nach der Versuchsdurchführung wurde mittels Mikroskop die Geradheit des Vektors geprüft und somit indirekt die Konstanz der Winkelgeschwindigkeit ermittelt. Dadurch war es möglich die Zeit für die Markierung zu berechnen (Formel (5)).

$$t_{\text{markier}} = \frac{\Delta y \cdot 360^\circ}{\pi \cdot d_{\text{warte}} \cdot \omega} \quad (5)$$

Die Wartezeit wurde so unter der Annahme, dass für die Beschleunigung und das Abbremsen die gleiche Zeit benötigt und auch der gleiche Winkel bei beiden Vorgängen zurückgelegt wurde, berechnet (Formel (6)). Dabei entspricht die Wartezeit der Beschleunigungszeit.

$$t_{\text{warte/exp}} = \frac{t_{\text{gesamt}} - t_{\text{markier}}}{2} \quad (6)$$

Mit Hilfe einer Regression wurde eine Funktion ermittelt, welche die Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelgeschwindigkeit und der Winkelbeschleunigung beschreibt.

Abschließend wurden auf das Werkstück Dreiecke aufgebracht. Dabei wurde für die Berechnung der Wartezeit die ermittelte Funktion angewandt. Anhand der Dreiecke wurde beurteilt, ob die korrigierte Funktion zur Lösung des Problems ausreicht.

3.4 Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde der Versuchsaufbau, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, verwendet. Als Optik wurde eine Planfeldoptik mit einer Brennweite von 160 mm genutzt. Während der Bearbeitung der Probeteile befand sich der Fokus auf der Mantelfläche des Bauteils.

3.4.1 Positioniergenauigkeit

Zur Untersuchung der Positioniergenauigkeit wurden auf einem Probewerkstück mit einem Durchmesser von 27,2 mm vier Gruppen von jeweils fünf Vektoren so aufgebracht, dass die vier Gruppen um 90° versetzt zueinander sind.

Die Vektoren sollten in Y-Richtung eine Abmessung von 0,5 mm und in X-Richtung eine Abmessung von 1 mm besitzen. Zwischen den einzelnen Vektoren einer Gruppe wurde die Achse um 2° verdreht.

Die Drehzahl der Achse wurde auf 10 min⁻¹ und die Winkelbeschleunigung auf 900 %s² eingestellt.

Nach der Markierung wurden die Vektoren hinsichtlich ihrer Abmessungen und ihres Abstandes mit Hilfe eines Mikroskops der Firma Keyence bei 150-facher Vergrößerung vermessen.

3.4.2 Wiederholgenauigkeit

Die Bestimmung der Wiederholgenauigkeit nach mehreren Umdrehungen erfolgte, indem 20 Vektoren mit der jeweiligen Abmessung von 1 mm in X- und in Y-Richtung über den Umfang eines Werkstückes verteilt aufgebracht wurden. Danach wurden je nach Versuchsdurchlauf um 100, 200, 300 bzw. 500 Umdrehungen weitergedreht und anschließend wieder 20 Vektoren an den gleichen Stellen wie bei der ersten Umdrehung aufgebracht.

Dabei wurde wieder mit einer Drehzahl von 10 min^{-1} und einer Winkelbeschleunigung von $900^\circ/\text{s}^2$ gearbeitet.

Der Versatz zwischen den Vektoren nach mehreren Umdrehungen wurde ebenfalls mikroskopisch ausgewertet.

3.4.3 Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

Für diesen Versuch wurden sowohl mit dem Clip-Box-Verfahren als auch mit der simultanen Bewegung von Scannerachse und Rotationsachse ein Dreieck und ein Kreis auf drei verschiedene metallische Werkstücke aufgebracht. Der Kreis hatte einen Durchmesser von 10 mm und das Dreieck entsprach mit seinen Koordinaten dem in Abbildung 16 skizzierten Dreieck.

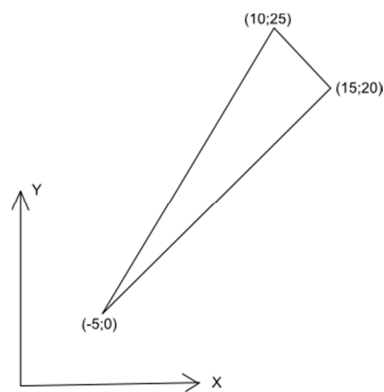


Abbildung 16: Skizze Dreieck

Die dabei notwendige Abarbeitungszeit auf der RTC wurde registriert und für die beiden Verfahren verglichen. Um bei beiden Verfahren gleiche Voraussetzungen zu haben wurde für das Arbeiten mit Clip-Boxen ein Markspeed gewählt, der in etwa der resultierenden Geschwindigkeit auf der Mantelfläche des Bauteiles beim Markieren mit der neuen Methode entspricht. Die vorgegebenen Werte sind in Tabelle 4 dargestellt. Als Materialien kamen Aluminium, Kupfer und Stahl zum Einsatz.

Tabelle 4: Parameter

Verfahren	Clip-Box-Verfahren			Superpositions-Verfahren		
Material	Al	Cu	Stahl	Al	Cu	Stahl
Durchmesser (mm)	24,9	24	27,1	24,9	24	27,1
Leistung (%)	100	100	100	100	100	100
Geschwindigkeit Scanner (mm/s)	17,63	17,63	17,63	im Skript berechnet	im Skript berechnet	im Skript berechnet
Drehzahl (min^{-1})	10	10	10	10	10	10
Frequenz (kHz)	80	50	80	80	50	80

3.4.4 Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

Die im Versuch 3.4.3 aufgebrachten Geometrien wurden hinsichtlich ihrer Qualität verglichen. Bei der Bewertung der Qualität wurde auf die Gleichmäßigkeit der Strukturen geachtet. Das heißt, dass als Qualitätsmerkmale vor allem Ansätze und die gleichmäßige Ausprägung der Vektoren betrachtet wurden.

4 Ergebnisse

4.1 Versuchsaufbau

Wie bereits erwähnt, ist es notwendig die Rotationsachse gegenüber der Scannerachse genau auszurichten. Die Ausrichtung muss dabei nur in der X-Y-Ebene erfolgen. Bezüglich dieser Ebene gibt es drei Freiheitsgrade. Dies sind die Verschiebungen entsprechend der X-Achse und der Y-Achse und die Drehung entsprechend der C-Achse um die Z-Achse (Abbildung 17).

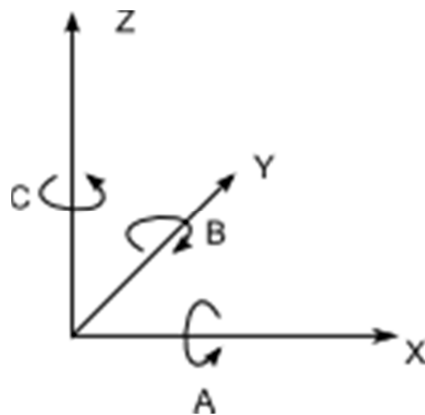


Abbildung 17: Koordinatenbezeichnung im Bearbeitungsraum

Betrachtet man nun eine Abwicklung der aufzubringenden Markierung, so muss die Y-Koordinate der Abwicklung durch eine Rotation entsprechend der negativen A-Achse realisiert werden. Es ist also notwendig die Rotationsachse gegenüber der Scannerachse so auszurichten, dass die Rotation um die X-Achse, die durch den Scanner beschrieben wird, erfolgt. Ohne Ausrichtung kann die Rotationsachse bezüglich der Scannerachse in Y-Richtung verschoben oder entsprechend der C-Achse verdreht sein.

Zur Korrektur wird von der Software eine Shift-Funktion bereitgestellt. Diese ermöglicht die Korrektur der Verschiebung in X- und in Y-Richtung. Somit wird also die X-Achse des Scanners zur Rotationsachse verschoben.

Steht aber die Rotationsachse in einem falschen Winkel zur X-Achse, so muss die Achse mechanisch positioniert werden. Da dies ohne Hilfsmittel nicht genau genug möglich ist, wurde eine Positionierhilfe gemäß dem Modell in Abbildung 18 entworfen und gefertigt.

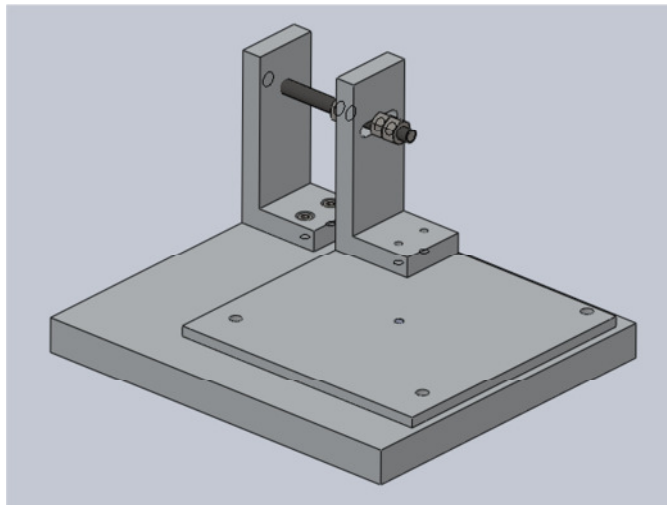


Abbildung 18: Modell der Positioniereinheit für die Rotationsachse

4.1.1 Entwurf und Fertigung der Positioniervorrichtung

Zur Befestigung der Achse war bereits eine Aluminiumplatte (Anhang Teil 1 Zeichnungsnummer 111118-03) vorhanden. Für die Positioniervorrichtung (Anhang Teil 1 Zeichnungsnummer 111118-00) wurde die Aluminiumplatte mit einer Stiftpassung für den Drehpunkt und Bohrungen für einen Aluminiumwinkel (Anhang Teil 1 Zeichnungsnummer 111118-04) ergänzt. Der Winkel aus Aluminium wurde am äußersten Rand der Befestigungsplatte angebracht und somit eine große Hebellänge erreicht. Je größer der Hebel ist, desto feiner ist die Einstellmöglichkeit der Positioniervorrichtung. In den Aluminiumwinkel wurde ein Langloch eingebracht, um die Beweglichkeit gegenüber der Grundplatte zu gewährleisten.

Die Befestigungsplatte ist mit der Grundplatte (Anhang Teil 1 Zeichnungsnummer 111118-01) durch einen Stift verbunden. Der Stift dient als Drehpunkt, um den sich die Befestigungsplatte gegenüber der Grundplatte entsprechend der C-Achse verdrehen kann. Die translatorischen Freiheitsgrade in X- und Y-Richtung werden dagegen durch den Stift blockiert. Auf der Grundplatte befindet sich ebenfalls ein Aluminiumwinkel (Anhang Teil 1 Zeichnungsnummer 111118-02) mit Gewindebohrung, in der eine Schraube angebracht wurde. Die Schraube reicht auch durch das Langloch des Winkels auf der Befestigungsplatte. Vor und hinter dem Langloch wurden jeweils zwei Schrauben angebracht, die sich gegenseitig kontern.

Dreht man nun an der Schraube, so drücken die Muttern entweder von der einen oder der anderen Seite gegen den Winkel mit dem Langloch. Dadurch wird der Winkel auf der Befestigungsplatte entweder zu dem Winkel auf der Grundplatte hin gezogen oder von ihm weggedrückt. Das führt dann zu einer Drehung der Rotationsachse um den Drehpunkt.

An den Entwurf wurden verschiedene Anforderungen gestellt. Der Winkel sollte im Bereich von $\pm 5^\circ$ mit einer Tolleranz von $\pm \beta$ verstellt werden können.

Um den Winkel β zu berechnen, wurde festgelegt, dass am Rand des Scannfeldes eine maximale Abweichung von der X-Achse entsprechend dem Strahldurchmessers d_{Strahl} im Fokus zugelassen werden kann. Für eine Optik mit einer Brennweite von 160 mm beträgt dieser Fokusbereich rund $50 \mu\text{m}$ und die Scannfeldabmessungen in X-Richtung wie in Y-Richtung 100 mm. Da der Mittelpunkt des Scannfeldes in X-Richtung knapp neben dem Spannfutter der Achse liegt, kann nur die Hälfte des Scannfeldes genutzt werden (Abbildung 19). In X-Richtung kann so eine maximale Länge von 50 mm markiert werden.

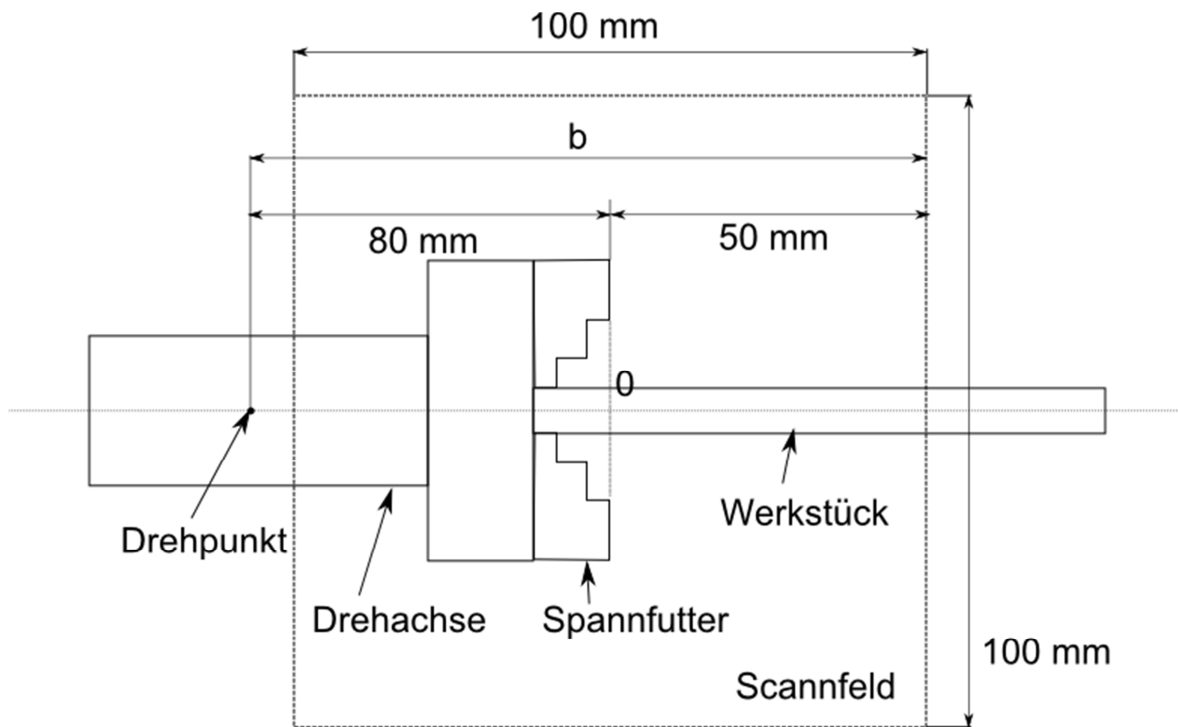
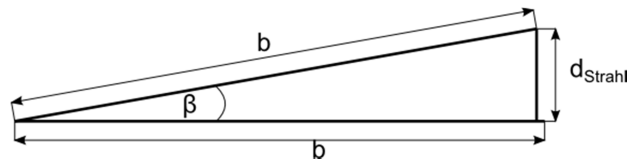


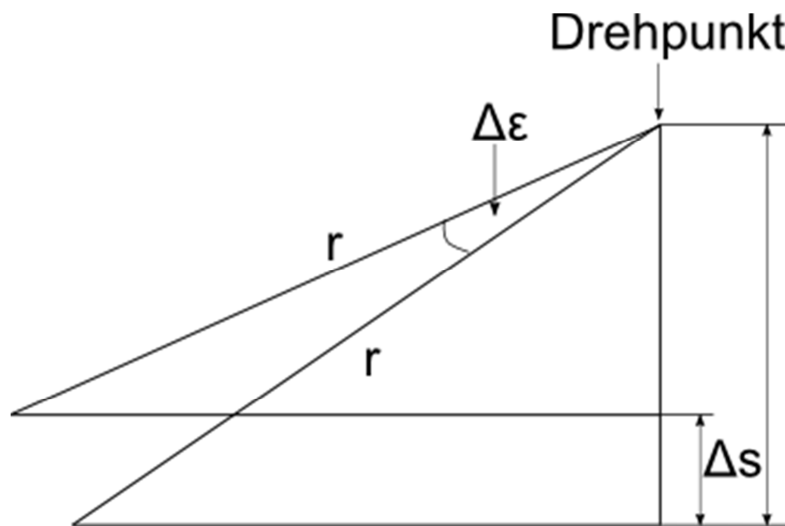
Abbildung 19: Abmessungen für die Berechnung von β

Der Abstand zwischen dem Rand des Spannfutters und dem Drehpunkt beträgt 80 mm. Somit ergibt sich ein maximaler Abstand b des noch zu markierenden Punktes zum Drehpunkt der Positioniervorrichtung von 130 mm. Aus den Maßen berechnet sich ein Winkel β von $0,022^\circ$ (Abbildung 20 und Formel (7)).

Abbildung 20: Skizze zur Berechnung von β

$$\sin \beta = \frac{d_{\text{Strahl}}}{b} \quad (7)$$

Als Einwirkungspunkt der Kraft wurde der Mittelpunkt des Langlochs auf der zur Achse zeigenden Fläche gewählt. Der Abstand r von diesem Punkt zum Drehpunkt beträgt 90,686 mm. In der Nullstellung, das heißt, wenn die Kanten der beiden Platten parallel zueinander sind, beträgt der Abstand l in Y-Richtung zwischen dem gewählten Punkt und dem Drehpunkt 68 mm. Ändert sich nun der Abstand in Y-Richtung durch Drehen der Schraube um den Weg Δs (Abbildung 21) so berechnet sich die Winkeländerung $\Delta \varepsilon$ gemäß Formel (8).

Abbildung 21: Skizz zur Berechnung von $\Delta \varepsilon$

$$\Delta \varepsilon = \arcsin \frac{l}{r} - \arcsin \frac{l - \Delta s}{r} \quad (8)$$

Nimmt man nun für $\Delta \varepsilon$ den minimal einstellbaren Winkel β an so ergibt sich ein Δs von 0,023 mm (Formel (9)).

$$\Delta s = l - r \cdot \sin(\arcsin \frac{l}{r} - \Delta \varepsilon) \quad (9)$$

Die Verschiebung erfolgt durch Drehen einer M8-Schraube. Um den Winkel η zu berechnen (Formel (10)), um den die Schraube gedreht werden muss, damit eine Verschiebung von Δs erfolgt, ist es notwendig die Steigung P der Schraube zu kennen. Nach DIN ISO 13-1 beträgt die Steigung einer M8-Schraube 1,25 mm.

Das bedeutet, dass sich die Schraube nach einer Umdrehung um 1,25 mm in axialer Richtung bewegt hat.

$$\eta = \frac{\Delta s}{p} \cdot 360^\circ \quad (10)$$

Für ein Δs von 0,023 mm ergibt sich so ein Winkel η von 6,64°. Mit Hilfe eines Schlüssels ist es möglich eine Schraube in einem Tolleranzbereich von $\pm 6,64^\circ$ einzustellen.

Die gefertigte Positioniervorrichtung Abbildung 22 entspricht demnach den geforderten Kriterien.

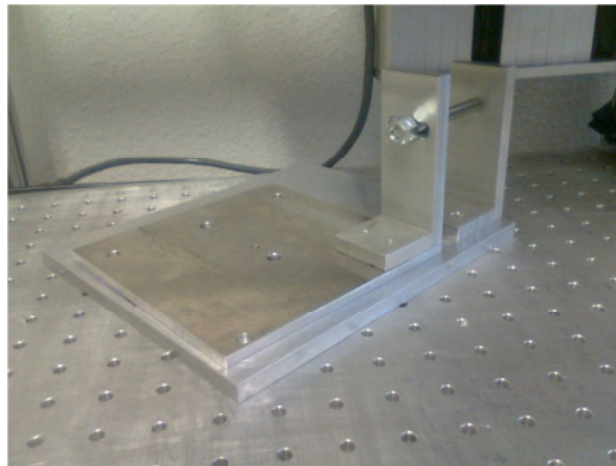


Abbildung 22: Positionierhilfe zur Ausrichtung der Rotationsachse gegenüber dem Scanner bezüglich der Verdrehung

4.1.2 Ausrichten der Rotationsachse mit Positioniervorrichtung

Um nun die Rotationsachse gegenüber dem Scanner auszurichten wird die Rotationsachse mittels Anschlagwinkel grob auf dem Arbeitsplatz ausgerichtet (Abbildung 23).

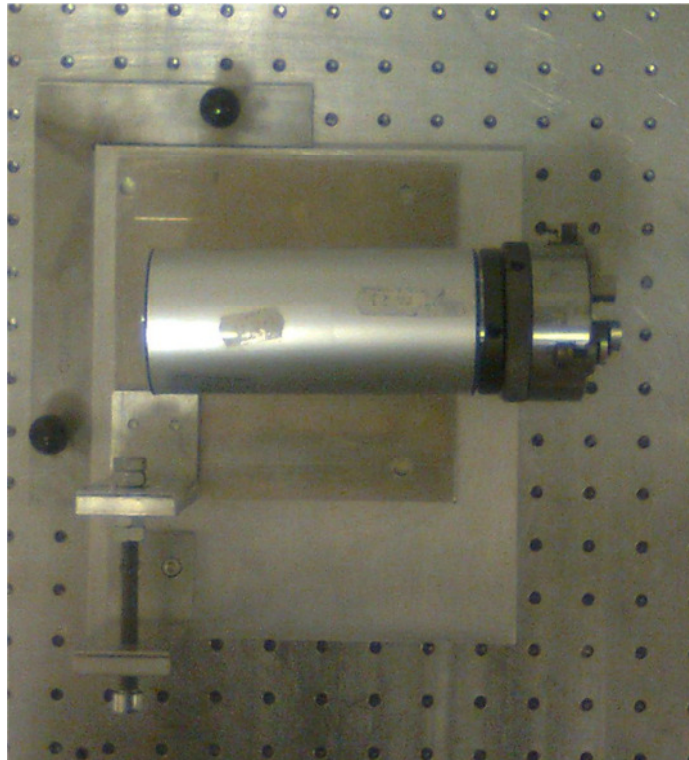


Abbildung 23: Grobe Positionierung der Achse mit Hilfe eines Anschlagwinkels

Danach wird ein Werkstück eingespannt, welches einen kleinen Durchmesser besitzt, aber lang genug ist um über die Grenze des Scannbereiches hinaus zu ragen.

Mit Hilfe des Pilotlasers wird nun ein Vektor entlang der X-Achse markiert, der durch den Nullpunkt geht und bis zum rechten Rand des Scannfeldes reicht.

Für die Feinpositionierung wird zuerst mit dem Befehl „Shift“ die X-Achse solange verschoben, bis sie das Werkstück schneidet, und eine Winkelkorrektur mittels Positioniervorrichtung so vorgenommen, dass die Rotationsachse parallel zum Vektor ausgerichtet ist. Danach erfolgt wieder eine Verschiebung der X-Achse durch den Befehl „Shift“ und auch wieder eine Winkelkorrektur. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis der vom Pilotlaser markierte Vektor im Bereich des Scannfeldes auf der Mitte des Werkstückes liegt (Abbildung 24).

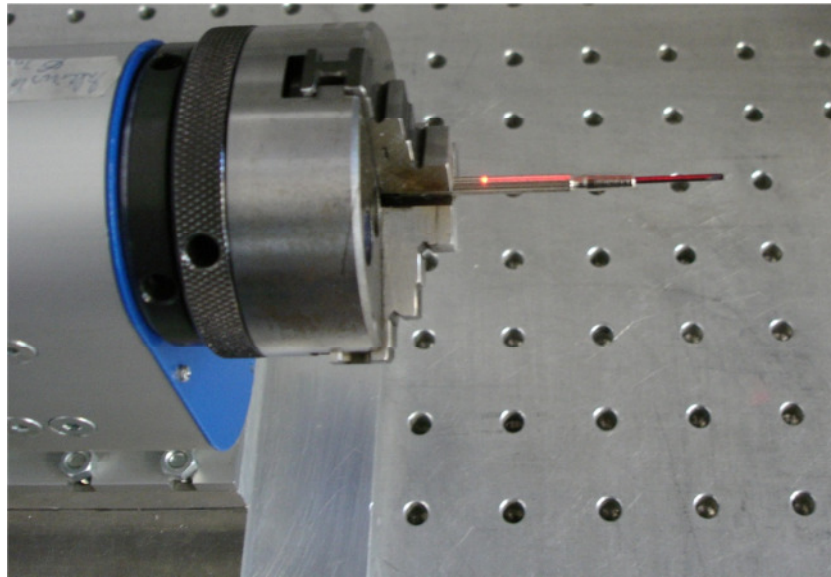


Abbildung 24: Ergebnis der Positionierung mit Pilotlaser

Nach erfolgreicher Positionierung sollte die Position der Achse mit Hilfe der Kontermuttern gegen weiteres Verdrehen gesichert werden.

4.2 Verfahrensentwicklung

4.2.1 Kommunikation zwischen Rotationsachse und Scanner

Das Statussignal „Fahrend“ des Achscontrollers wird zur Steuerung des Scanners genutzt. Dafür ist der Ausgang 1 des Achscontrollers mit dem externen Start auf der RTC verbunden. Der Eingang ist auf die LOW-HIGH-Flanke getriggert und die Bewegung des Scanners kann auf die Bewegung der Rotationsachse abgestimmt werden.

4.2.2 Verfahrensumsetzung

Markieren einzelner Vektoren

Gemäß dem Versuchsaufbau erfolgt die Markierung in X-Richtung mit Hilfe des Scanners und in Y-Richtung mit Hilfe der Rotationsachse.

Um nun einen geraden Vektor zu markieren müssen die Geschwindigkeit des Scanners und die Winkelgeschwindigkeit genau aufeinander abgestimmt werden. Dabei muss bei konstanter Winkelgeschwindigkeit der Rotationsachse das Verhältnis zwischen der Scannergeschwindigkeit und der Radialgeschwindigkeit auf der Mantelfläche des Werkstückes genauso groß sein wie das Verhältnis zwischen X-Komponente und Y-Komponente des zu markierenden Vektors (Formel (11)).

$$\frac{\overrightarrow{v_{Scanner}}}{\overrightarrow{v_{radial}}} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (11)$$

Basierend auf dieser Grundlage lässt sich die Scannergeschwindigkeit für die Markierung berechnen (Formel (12)).

$$\overrightarrow{v_{Scanner}} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \frac{\omega}{2} \cdot d_{Bauteil} \quad (12)$$

Für die Markierung eines einzelnen Vektors wurde ein Skript im LasPaint entwickelt. In diesem Skript wird zunächst die Drehzahl und die Beschleunigung der Rotationsachse, der Durchmesser des Bauteils sowie der Start- und Endpunkt des zu markierenden Vektors angegeben. Aus diesen Werten werden die Winkelgeschwindigkeit, der Bauteilumfang, die X- und die Y-Komponente des Vektors, die Scannergeschwindigkeit, die Beschleunigungszeit, der Markierwinkel (Formel (13)), der Beschleunigungswinkel (Formel (4)) und der Gesamtdrehwinkel berechnet.

$$\varphi_{markier} = \frac{\Delta y}{\pi \cdot d_{Bauteil}} \cdot 360^\circ \quad (13)$$

Um für die gesamte Bearbeitung eine konstante Drehzahl zu garantieren, muss der Beschleunigungswinkel zweimal zum Markierwinkel addiert werden (Formel (14)), weil dieser Winkel einmal während der Beschleunigung und ein zweites Mal während des Bremsvorgangs zurückgelegt wird.

$$\varphi_{ges} = \varphi_{markier} + 2 \cdot \varphi_{warte} \quad (14)$$

Sind die Berechnungen abgeschlossen, wird der Scanner in seine Ausgangsposition gebracht und in die asynchrone Bearbeitung übergegangen. Das ist notwendig, damit das Skript weiter abgearbeitet werden kann, während die Rotationsachse sich dreht. In der asynchronen Bearbeitung werden zunächst die Parameter des Scanners und der Rotationsachse an die RTC bzw. den Achscontroller übergeben. Die RTC erhält den Befehl, dass sie mit der weiteren Abarbeitung des Skriptes auf das externe Startsignal warten soll und die Achse wird gestartet. Registriert die RTC das externe Startsignal, so folgt die Wartezeit, in der die Beschleunigung der Rotationsachse stattfindet. Erst dann beginnt der Scanner in X-Richtung einen Vektor zu markieren, der die Länge der X-Komponente des zu markierenden Vektors besitzt. Durch die Superposition des Scanners mit der Rotationsachse und die aufeinander abgestimmten Geschwindigkeiten erhält man einen Vektor mit den vorgegebenen Abmessungen.

Auf dieser Grundlage kann die Markierung von einfachen Geometrien erfolgen. Die einzelnen Vektoren werden dabei nach dem eben erläuterten Prinzip markiert.

Markieren von allgemeiner Dreiecke

Für die Markierung von allgemeinen Dreiecken entstand das im Anhang Teil 2 unter „Dreiecke“ zu findende Skript. Zur Ausführung dieses Skriptes werden die für die Markierung eines Vektors notwendigen Parameter, außer dem Start- und dem Endpunkt des Vektors im Skript erfasst. Der Start- und der Endpunkt des jeweiligen Vektors werden durch die drei Eckpunkte des Dreieckes auf der Abwicklung angegeben. Aus den Koordinaten der Abwicklung, der Drehzahl und dem Bauteildurchmesser werden für jeden der drei Vektoren die entsprechenden Geschwindigkeiten des Scanners im Skript ermittelt. Wie in 0 beschrieben, wird zunächst der erste Vektor markiert. Anschließend wird die Rotationsachse so positioniert, dass nach der Beschleunigungsphase der Startpunkt des neuen Vektors mit dem Endpunkt des vorhergehenden Vektors übereinstimmt. So werden nacheinander die drei Vektoren markiert.

Markieren von regelmäßiger N-Ecke

Bei der Markierung von einem regelmäßigen N-Eck werden wie auch beim Dreieck die für die Markierung eines Vektors notwendigen Parameter, ohne Start- und Endpunkt des Vektors im Skript erfasst. Das N-Eck selbst wird durch die Anzahl der Ecken, einen Mittelpunkt und einen Eckpunkt definiert. Dabei sind die Koordinaten der beiden Punkte Koordinaten der Abwicklung. Das Skript für diese Markierung ist ebenfalls im Anhang Teil 2 enthalten.

Zunächst werden die Berechnungen ausgeführt, die für alle Vektoren konstant sind und der Zentriwinkel ζ des N-Eckes berechnet (Formel (15)).

$$\zeta = \frac{360^\circ}{N} \quad (15)$$

Der Zentriwinkel ist dabei der Winkel der durch einen Eckpunkt den Mittelpunkt und den nachfolgenden Eckpunkt definiert wird. In Abbildung 25 ist der Zentriwinkel am Beispiel eines 5-Eckes dargestellt.

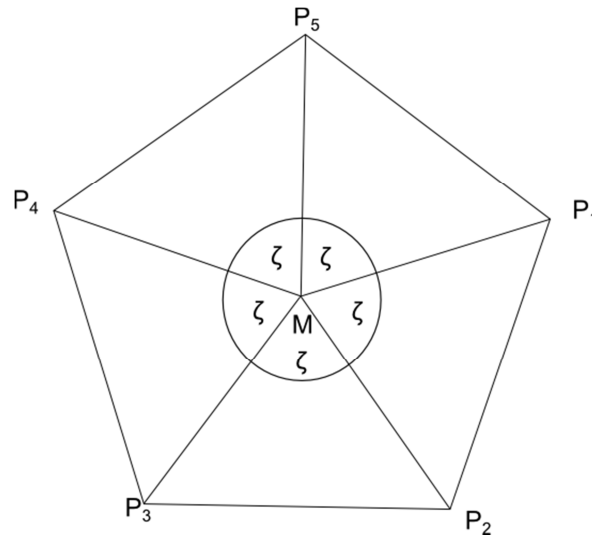


Abbildung 25: Zentriwinkel am Beispiel eines regelmäßigen 5-Eckes

Somit ergibt sich für das Beispiel ein Zentriwinkel von 72° .

Um nun die Vektoren markieren zu können sind die weiteren Eckpunkte erforderlich. Der Anfangspunkt des ersten Vektors ist durch die Vorgaben bereits bekannt. Der Endpunkt dieses Vektors und jeder weitere Punkt wird mit Hilfe einer Drehmatrix (Formel (16)) berechnet.

$$D = \begin{bmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta \\ \sin \zeta & \cos \zeta \end{bmatrix} \quad (16)$$

Multipliziert man nun die Drehmatrix mit dem Vektor, der vom Mittelpunkt zum bekannten Punkt P_n reicht, so erhält man den Vektor, der vom Mittelpunkt zum Punkt P_{n+1} weist (Formel (17)).

$$\overrightarrow{MP_{n+1}} = D \cdot \overrightarrow{MP_n} = \begin{pmatrix} (x_n - x_M) \cdot \cos \zeta - (y_n - y_M) \cdot \sin \zeta \\ (x_n - x_M) \cdot \sin \zeta + (y_n - y_M) \cdot \cos \zeta \end{pmatrix} \quad (17)$$

Addiert man nun den Ortsvektor des Mittelpunktes so erhält man den Ortsvektor des Punktes P_{n+1} (Formel (18)).

$$\overrightarrow{p_{n+1}} = \vec{m} + \overrightarrow{MP_{n+1}} = \begin{pmatrix} x_M + (x_n - x_M) \cdot \cos \zeta - (y_n - y_M) \cdot \sin \zeta \\ y_M + (x_n - x_M) \cdot \sin \zeta + (y_n - y_M) \cdot \cos \zeta \end{pmatrix} \quad (18)$$

Im Skript wird nun immer nur der Endpunkt des zu markierenden Vektors berechnet. Mit den Koordinaten des Anfangspunktes und des Endpunktes wird die Scannergeschwindigkeit ermittelt. Dann wird dieser Vektor markiert, die Koordinaten des Endpunktes in die Variablen für den Startpunkt übertragen und jetzt erst der nächste Punkt berechnet. Dies wird mit einer Schleife realisiert, die genau N Durchläufe besitzt.

Markieren von Strukturen von regelmäßigen N-Ecken

Zur Erzeugung von Strukturen wurde das Skript zur Markierung von N-Ecken erweitert.

In diesem Skript kann ein minimaler und ein maximaler Abstand zwischen den einzelnen Geometrien in Y-Richtung angegeben werden. Aus diesen Werten wurde der kleinste optimale Abstand berechnet, bei dem eine gleichmäßige Verteilung der Geometrien über den Umfang möglich ist. Diese Berechnung erfolgte indem der Umfang des Bauteils durch den minimalen Abstand dividiert und auf die nächste größere ganze Zahl aufgerundet wurde. Dividiert man nun den Bauteilumfang durch diese ganze Zahl, welche die Anzahl der Geometrien ist, so erhält man den optimalen Abstand der Geometrien, der größer oder gleich dem minimalen angegebenen Abstand ist. Dieser optimale Abstand ist der Abstand der Geometrien innerhalb einer Zeile. Anschließend wurde geprüft, ob dieser berechnete optimale Abstand auch kleiner als die angegebene obere Grenze des Abstandes ist. Trifft dies nicht zu so wird eine Fehlermeldung ausgegeben, dass die Grenzen zu eng gewählt wurden.

Der Abstand zwischen den Zeilen und der Versatz zwischen den Geometrien von Zeile zu Zeile kann vorgegeben werden. Es ist aber auch möglich den Zeilenabstand und den Versatz vom Programm vorgeben zu lassen. In diesem Fall beträgt der Versatz die Hälfte des optimalen Abstandes der Geometrien innerhalb einer Zeile. Der Zeilenabstand wird dann mit dem Versatz gleichgesetzt.

Die Markierung erfolgt mit Hilfe von drei ineinander liegenden Schleifen. In der inneren Schleife wurde das N-Eck markiert, wie es in 0 beschrieben ist. In der mittleren Schleife wurde jeweils ein neuer Mittelpunkt und ein neuer Startpunkt für die nächste Geometrie berechnet, in dem zu den Y-Werten des vorhergehenden Mittelpunktes und des vorhergehenden Startpunktes jeweils der optimale Abstand addiert wurde. Die äußere Schleife realisierte den Sprung in die nächste Zeile. Dies wurde durch eine Addition des Zeilenabstandes zum X-Wert des Mittelpunktes und zum X-Wert des Startpunktes berechnet. Um den Versatz zu realisieren wurde zusätzlich in diesem Schritt noch der Versatz zum Y-Wert des Mittelpunktes und des Startpunktes addiert.

So können Strukturen auf das Werkstück aufgebracht werden.

4.3 Vorversuch Wartezeit Scanner

Die aus den Messwerten nach den Formeln (5) und (6) berechneten Ergebnisse für die Wartezeit sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.

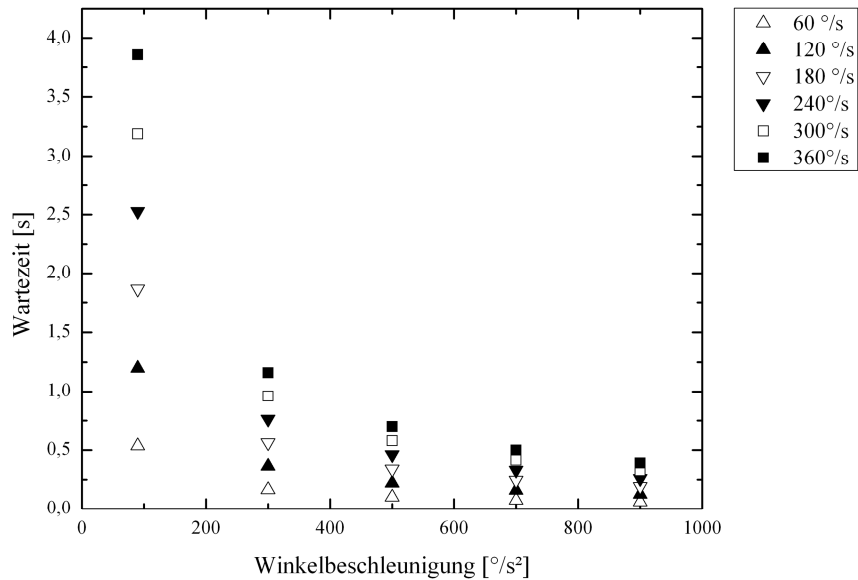


Abbildung 26: Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelbeschleunigung

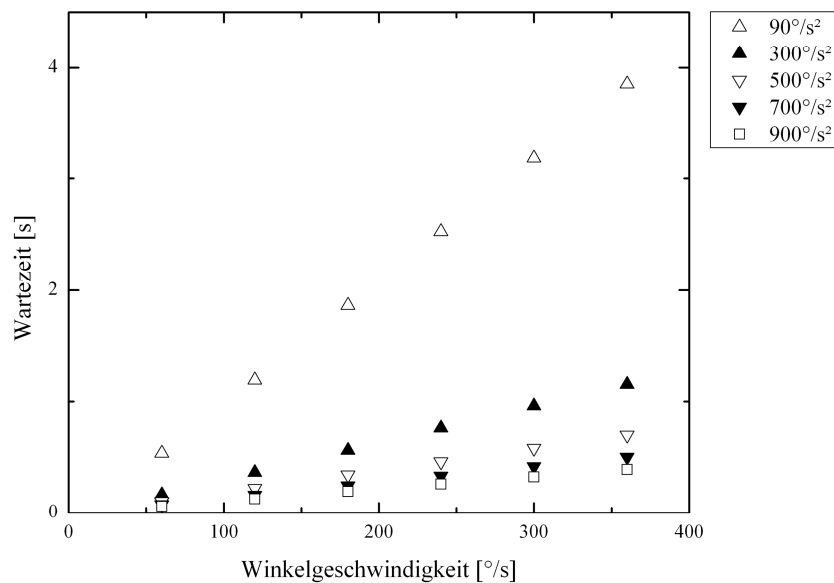


Abbildung 27: Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelgeschwindigkeit

4.4 Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens

4.4.1 Positioniergenauigkeit

Unter dem Mikroskop sind bei 150-facher Vergrößerung die in Abbildung 28 dargestellten Strukturen zu erkennen.

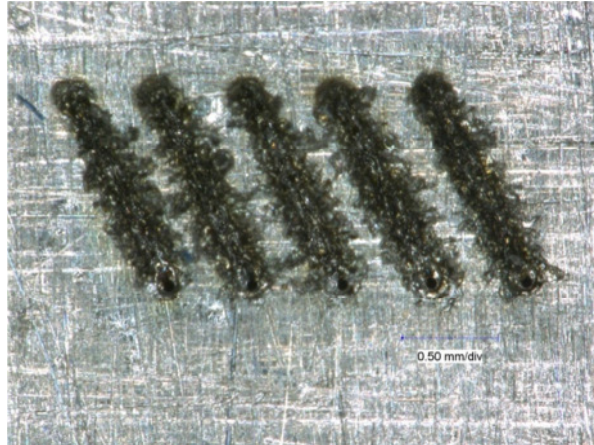


Abbildung 28: Markierungsergebnis zur Positioniergenauigkeit

Zwischen den Vektoren sollte die Achse immer um einen Winkel φ von 2° weitergedreht werden. Das entspricht einem Abstand q zwischen den Vektoren von $0,47473 \text{ mm}$ (Formel (19)).

$$q = \frac{\varphi}{360^\circ} \cdot \pi \cdot d_{\text{Bauteil}} \quad (19)$$

Aus 48 Messwerten ergibt sich, dass die Abweichung vom gegebenen Wert zwischen $-50,21 \text{ }\mu\text{m}$ und $24,62 \text{ }\mu\text{m}$ liegen und damit einer Winkelabweichung zwischen $-6,35'$ und $3,11'$ entsprechen.

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta q}{\pi \cdot d_{\text{Bauteil}}} \cdot 21600' \quad (20)$$

Außerdem wurden auch die Abweichungen der Vektorlängen in X- und in Y-Richtung ermittelt. Dabei schwanken die Werte der Abweichung für 48 Messungen in Y-Richtung zwischen $-29,7 \text{ }\mu\text{m}$ und $101,9 \text{ }\mu\text{m}$. Die gemessene Abweichung wird durch eine Winkelabweichung zwischen $-3,75'$ und $12,88'$ hervorgerufen (Formel (20)).

Für die X-Komponente ist nach 48 Messungen eine Abweichungen im Bereich zwischen $-133 \text{ }\mu\text{m}$ und $19,3 \text{ }\mu\text{m}$ zu verzeichnen.

4.4.2 Wiederholgenauigkeit

Durch die zweimalige Bearbeitung entstehen Gravuren, wie sie in Abbildung 29 gezeigt sind.



Abbildung 29: Markierergebnis des Versuches zur Wiederholgenauigkeit bei 500 Umdrehungen

Es konnten weder für 100, noch für 200, 300 oder 500 Umdrehungen (Abbildung 29) bei 150-facher Vergrößerung zwei Spuren erkannt werden. Somit konnte kein Abstand zwischen den Spuren gemessen werden.

4.4.3 Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

4.4.3.1 Dreiecke

Für diesen Versuch standen rotationssymmetrische Werkstücke aus Kupfer, Stahl und Aluminium zur Verfügung.

Mit dem entwickelten Verfahren ist es möglich alle drei Materialien zu bearbeiten.

Bei der Bearbeitung mit dem Superpositionsverfahren wurde für alle drei Materialien eine Beschriftungszeit von 6 s benötigt. Bei dem Clip-Box-Verfahren war die Beschriftungszeit vom Material abhängig. So wurde der Stahl innerhalb von 31,4 s markiert. Beim Aluminium dauerte dies 32,8 s und für die Markierung des Kupfers wurden 35,3 s benötigt.

4.4.3.2 Kreise

Die Untersuchung der Kreismarkierung ergab nur eine geringe Zeitdifferenz zwischen den beiden Verfahren. Bei beiden Verfahren sind in diesem Versuch materialabhängige Beschriftungszeiten zu verzeichnen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Beschriftungszeiten für die Kreismarkierung

	Stahl	Kupfer	Aluminium
Clip-Box-Verfahren	19,9 s	20,6 s	19,8 s
Superpositionsverfahren	17,6 s	17,5 s	17,9 s

4.4.4 Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

4.4.4.1 Dreiecke

Zwischen den beiden Verfahren sind nur geringe Qualitätsunterschiede zu erkennen

Bei allen drei Werkstoffen wirkt die aufgebrachte Kontur bei der Superpositionsmethode gleichmäßiger als bei der Clip-Box-Methode. In der Vergrößerung des Dreieckes, welches mit der Clip-Box-Methode auf das Aluminiumwerkstück aufgebracht wurde, erkennt man einen Ansatz. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildung 30 bis Abbildung 35 dargestellt.

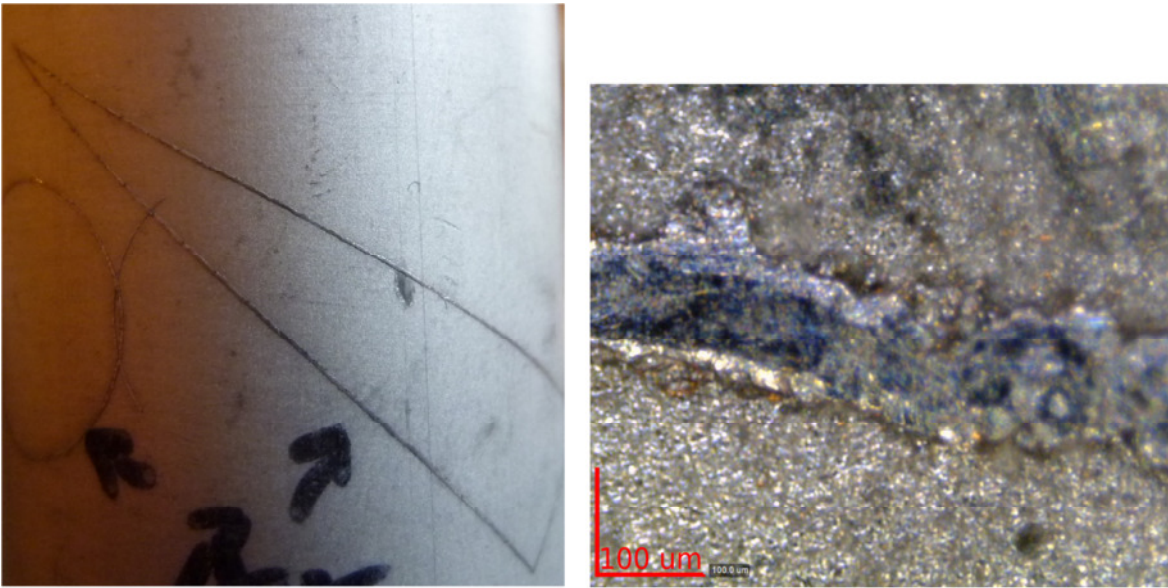


Abbildung 30:Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Aluminium mit dem Clip-Box-Verfahren

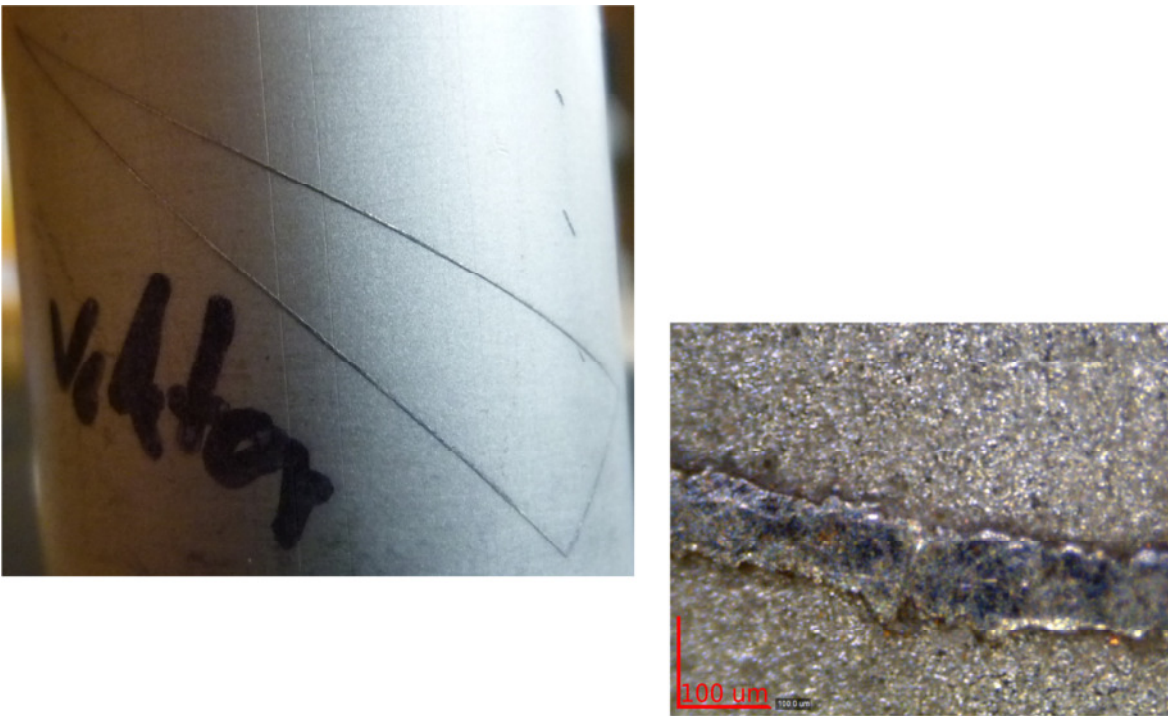


Abbildung 31: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Aluminium mit dem Superpositionsverfahren

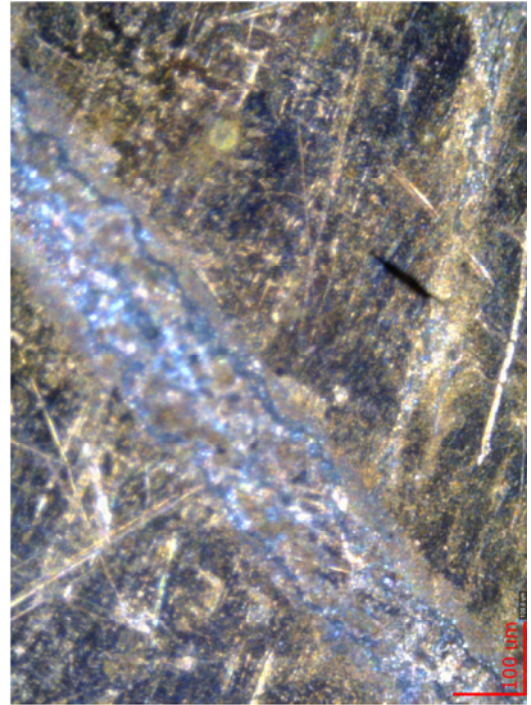


Abbildung 32: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Kupfer mit dem Clip-Box-Verfahren

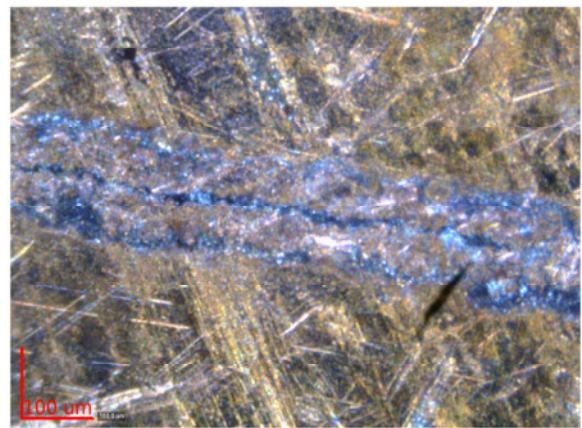


Abbildung 33: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Kupfer mit dem Superpositionsverfahren

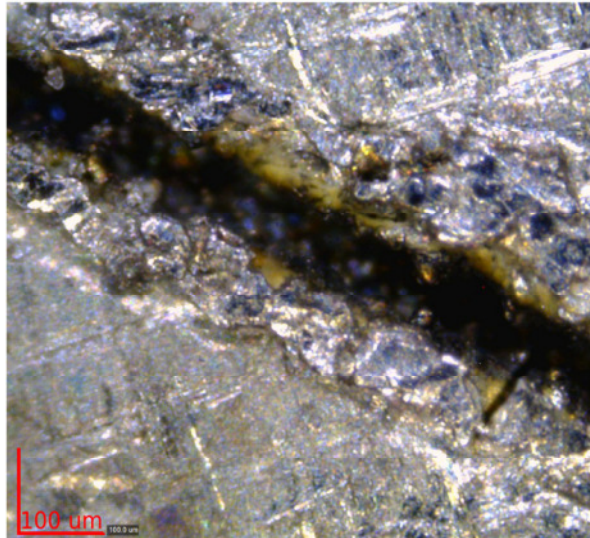


Abbildung 34: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Stahl mit dem Clip-Box-Verfahren

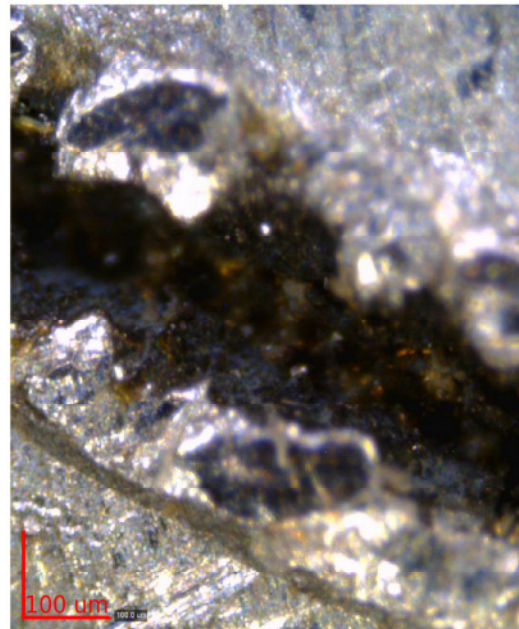


Abbildung 35: Das Bearbeitungsergebnis für ein Dreieck auf Stahl mit dem Superpositionsverfahren

4.4.4.2 Kreise

Bei diesem Versuch war die Kontur der Geometrien, die mit der Clip-Box-Methode aufgebracht wurden, gleichmäßiger. Bei der Superpositionsmethode sind starke Unregelmäßigkeiten in der Linienführung zu erkennen. Auf dem Aluminium- und dem Stahlwerkstück, welche mit dem Clip-Box-Verfahren markiert wurden, sind Ansätze zu sehen. In den Abbildung 36 bis Abbildung 41 sind die Ergebnisse bei der Markierung eines Kreises zu sehen.

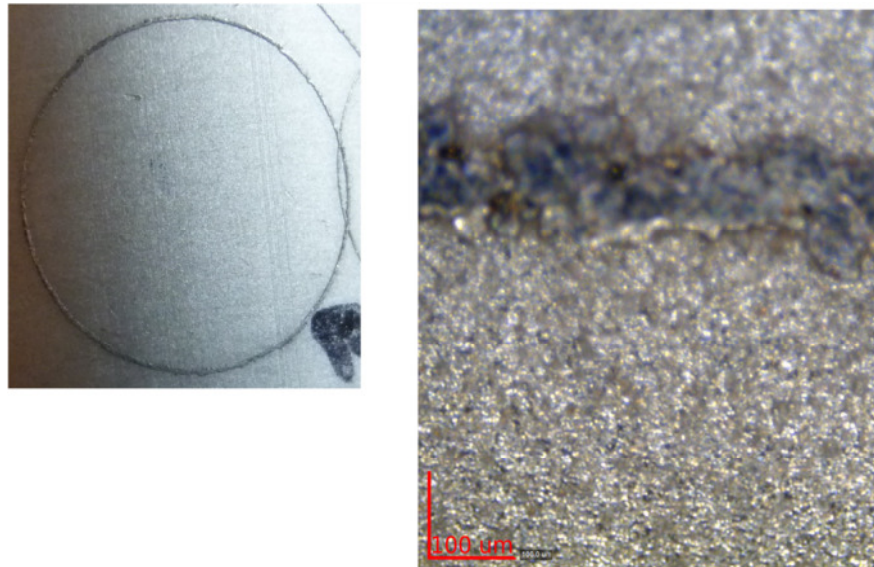


Abbildung 36: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Aluminium mit dem Clip-Box-Verfahren

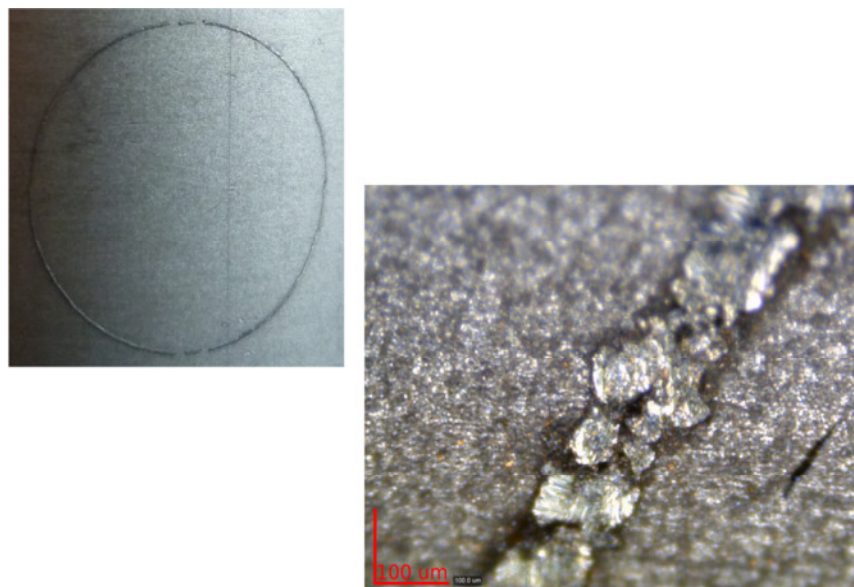


Abbildung 37: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Aluminium mit dem Superpositionsverfahren

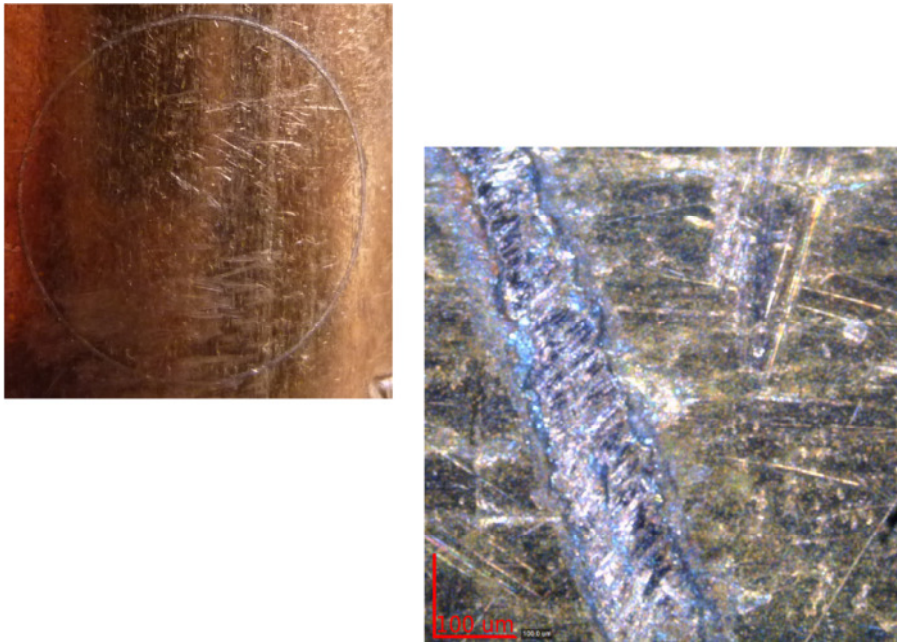


Abbildung 38: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Kupfer mit dem Clip-Box-Verfahren

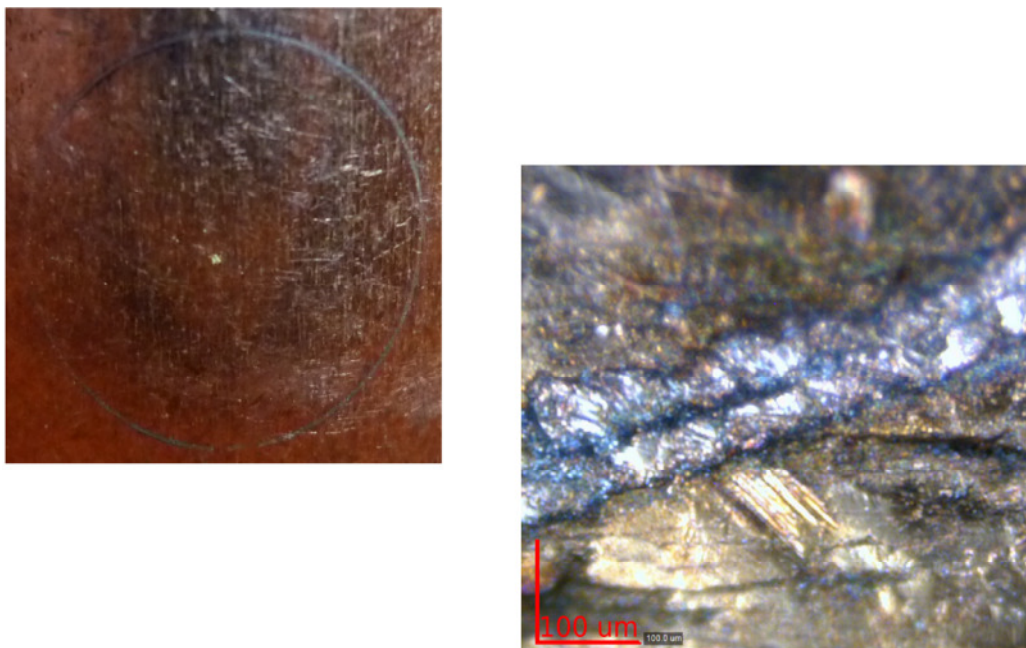


Abbildung 39: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Kupfer mit dem Superpositionsverfahren

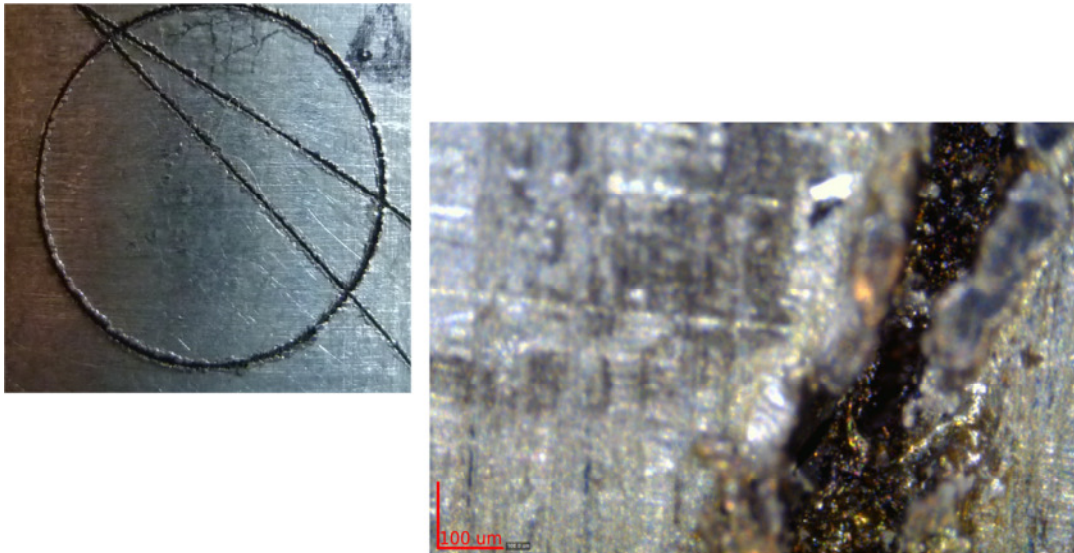


Abbildung 40: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Stahl mit dem Clip-Box-Verfahren

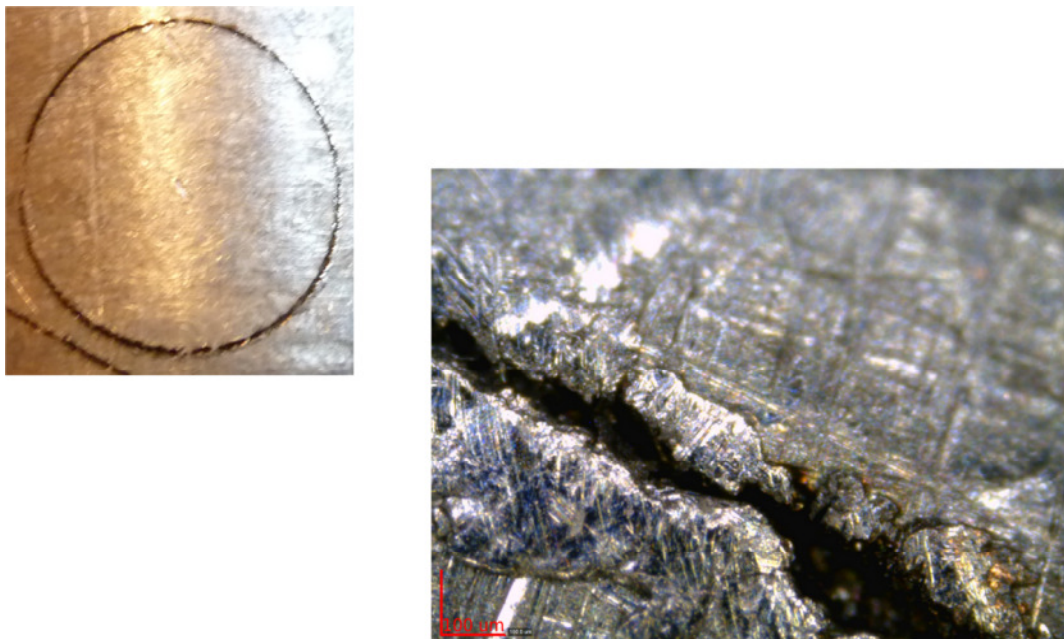


Abbildung 41: Die Bearbeitungsergebnisse für einen Kreis auf Stahl mit dem Superpositionsverfahren

5 Diskussion und Auswertung

5.1 Versuchsaufbau

Mit diesem Versuchsaufbau konnte zwar das Prinzip des Superpositionsverfahrens nachgewiesen werden, er ist aber so nicht für die Mikrobearbeitung nutzbar. Die für den bisherigen Aufbau gewählte Achse erfüllt nicht die notwendigen Anforderung eines Positionssignals..

Die gute Positionier- und Wiederholgenauigkeit kann bei der Bearbeitung nicht ausgenutzt werden, da die Synchronisation nur über ein Statussignal erfolgt. Durch Nutzung einer Positionserfassung in Echtzeit könnte die Bearbeitungsgenauigkeit verbessert werden.

Für die Mikrostrukturierung besitzt die Positioniervorrichtung der Rotationsachse eine zu große Positionierabweichung, weil das Kontern der Muttern eine kleine Winkeländerung bewirken kann. Hinzu kommt die Ungenauigkeit der Ausrichtung, da sie nur visuell geprüft wird. Die Prüfung erfolgt mittels des Pilotstrahls, der einen größeren Strahldurchmesser besitzt als der Bearbeitungsstrahl und somit Abweichungen zur Folge hat.

5.2 Verfahrensentwicklung

Die Funktionsfähigkeit des Verfahrens wurde nachgewiesen, jedoch erfordert die Anwendung in der Mikrostrukturierung eine weitere Optimierung.

Durch die Nutzung des Statussignales können nicht für jede Drehzahl der Achse die Vektoren genau markiert werden. Nutzt man dafür ein Positionssignal, so erfolgt die richtige Positionierung der Vektoren auch bei anderen Drehzahlen der Achse.

Zudem ist die Markiergeschwindigkeit bei der Markierung von Geometrien nicht für jeden Vektor gleich. Das führt zu einer unregelmäßigen Markierung der Geometrien, die vermieden werden können, in dem nicht die Drehzahl für die gesamte Markierung angegeben wird sondern die Markiergeschwindigkeit. Aus ihr kann dann die Drehzahl der Achse sowie die Scannergeschwindigkeit für jeden Vektor einzeln berechnet werden und jeder Vektor wird mit derselben Streckenenergie markiert. Dadurch kann eine gleichmäßige Markierung erreicht werden.

5.3 Vorversuch Wartezeit Scanner

Führt man den Versuch bei immer gleicher Endgeschwindigkeit aus, so kann man eine Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelbeschleunigung erkennen. (Abbildung 26 und Formel (21))

$$t_{\text{warte/korrigiert}} = \frac{c_{\alpha 1}}{\alpha} + c_{\alpha 2} \quad (21)$$

Erfolgt die Versuchsdurchführung dagegen bei immer gleicher Winkelbeschleunigung, so ist eine lineare Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelgeschwindigkeit zu verzeichnen (Abbildung 27 und Formel (22)).

$$t_{\text{warte/korrigiert}} = c_{\omega 1} \cdot \omega + c_{\omega 2} \quad (22)$$

Aus diesen beiden Formeln ergibt sich für die Abhängigkeit der Wartezeit von der Winkelgeschwindigkeit und der Winkelbeschleunigung die Formel (23).

$$t_{\text{warte/korrigiert}} = \frac{c_1 \cdot \omega + c_2}{\alpha} + c_3 \quad (23)$$

Mittels einer Regression wurden die Konstanten c_1 , c_2 und c_3 aus den oben dargestellten Werten ermittelt.

$$c_1 = 0,99549313; \quad c_2 = -12,0475369 \frac{\circ}{s}; \quad c_3 = 0,00594975 \text{ s}$$

Testet man diese Korrekturfunktion durch Markierung eines Dreieckes, so stellt man fest, dass diese Korrekturfunktion nur bei einer Winkelgeschwindigkeit von 60°/s den Fehler behebt. Allerdings gibt es bei dieser Winkelgeschwindigkeit keine Einschränkung mit welcher Winkelbeschleunigung innerhalb des untersuchten Intervalls gearbeitet werden darf.

5.4 Versuche zur Prüfung der Qualität des Verfahrens

5.4.1 Positioniergenauigkeit

Die ermittelten Werte entsprechen nicht den angegebenen Toleranzen der Rotationsachse und des Scanners. Ein Grund dafür ist, dass die Werkstücke nicht genau genug unter dem Mikroskop ausgerichtet werden konnten, weshalb die X- und die Y-Komponente des Vektors um einen kleinen Winkel zu den gemessenen X- und Y-Werten verdreht waren.

Außerdem kommen durch das Arbeiten mit ausschließlich berechneten Werten ebenfalls Fehler in der Positionierung hinzu. Diese Fehler könnten durch eine Achse mit Encodern minimiert werden, weil dann mit tatsächlichen Positionssignalen gearbeitet werden kann.

5.4.2 Wiederholgenauigkeit

Da nach 500 Umdrehungen keinerlei Ungenauigkeiten zu erkennen sind, ist dies für die Mikrobearbeitung eine gute Voraussetzung. Es ist aber zu beachten, dass bei dem Versuch immer nur in eine Richtung gedreht wurde und so das Umkehrspiel nicht mit betrachtet werden konnte.

Außer der hohen Wiederholgenauigkeit besitzt der Schrittmotor auch eine bessere Positioniergenauigkeit als ein Servomotor. Servomotoren lassen dagegen höhere Drehzahlen und Beschleunigungen zu. Die Auflösung von Schrittmotoren entspricht der Auflösung von sinuskommutierten Servomotoren mit hochauflösenden Encodern und Regelkreisen, welche zu einem Vielfachen der Kosten eines Servomotors erhältlich sind.

Für weitere Entwicklungen ist es daher zweckmäßig einen closed-loop Schrittmotor zu verwenden, da mit einem solchen Schrittmotor die Genauigkeit und die Auflösung im Vergleich zum verwendeten Schrittmotor verbessert werden kann.

Für hochdynamische Anwendungen gibt es auch servogeregelte Schrittmotoren welche die Vorteile eines Schrittmotors mit den Vorteilen eines Servomotors vereinen. Dadurch sind hohe Genauigkeit und eine hohe Auflösung auch bei großen Drehzahlen möglich.
(11)

5.4.3 Beschriftungszeit im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

Bei den bisher möglichen einfachen Geometrien ist die Superpositionsmethode schneller als die Methode mit den Clip-Boxen. Allerdings wurde auch beobachtet, dass je komplexer die Markierung ist, die Bearbeitungszeiten sich immer mehr angleichen. Bei komplexen Grafiken ist daher anzunehmen, dass das Clip-Box-Verfahren schneller ist. Dies konnte aber nicht getestet werden, da es noch nicht möglich ist, solche Grafiken mit dem Superpositionsverfahren zu markieren.

5.4.4 Beschriftungsqualität im Vergleich zum Clip-Box-Verfahren

Mit diesem Versuch konnte nachgewiesen werden, dass bei langen Vektoren eine bessere Qualität erreicht werden kann als beim Clip-Box-Verfahren. Die schlechtere Qualität bei den Kreisen kommt daher, dass mit unterschiedlichen resultierenden Geschwindigkeiten gearbeitet wird. Zusätzlich wird der Kreis durch ein 40-Eck angenähert, was zur Folge hat, dass durch die vielen kleinen Vektoren immer wieder angesetzt werden muss.

6 Ausblick

Die Leistungsfähigkeit und die Anwenderfreundlichkeit des in der Arbeit entwickelten Verfahrens kann noch weiter verbessert werden.

Die Verwendung von Encodersignalen würde eine Synchronisation des Scanners mit den tatsächlichen Positionen der Achse ermöglichen. Dadurch würde die Berechnung der Wartezeit entfallen und man könnte den gesamten Drehzahlbereich der Rotationsachse nutzen.

Als Motor kann sowohl ein Schrittmotor mit Positionserfassung als auch ein Servomotor eingesetzt werden, da für beide Varianten das Auflösungsvermögen des Messsystems entscheidend ist. Servomotoren neigen aber bei Positionierbefehlen mit hohen Geschwindigkeiten zu Überschwingungen, die für die Mikrobearbeitung ungünstig sind. Aus diesem Grund sollte für Bearbeitungen bei hohen Geschwindigkeiten besser ein servogeregelter Schrittmotor eingesetzt werden.

Eine gleichmäßige Beschriftung lässt sich nur durch eine konstante Streckenenergie ermöglichen. Dafür ist es notwendig, dass bei gleichbleibender Laserleistung jeder Vektor mit der gleichen Geschwindigkeit markiert wird. Im Skript sollte somit aus einer vorgegebenen Markiergeschwindigkeit die Drehzahl und die Scannergeschwindigkeit für jeden Vektor einzeln berechnet werden.

Die Bedienerfreundlichkeit des Verfahrens lässt sich durch Einbindung der Funktionen ins LasPaint verbessern. Der Programmierer könnte dann auf vorgefertigte Befehle zurückgreifen, bei denen nur die Anwendungsparameter angegeben werden müssen. Außerdem sollte es dann möglich sein ein Vorschaubild für die Markierung zu erzeugen.

Um das Anwendungsspektrum des Verfahrens zu erweitern sollte auch eine Markierung von Text und weiteren Geometrien realisiert werden.

Literaturverzeichnis

1. **Cambridge Technology, Inc.** Scan Head: Installation and Operation Manual. Lexington (USA) : Cambridge Technology, Inc., 2008. P0900-0120 Rev. 1.5.2..
2. **NN.** How Laser Show Works-Scanning System. [Online] [Zitat vom: 22. Oktober 2011.] <http://www.laserfx.com/Works/Works3S.html>.
3. **Rummich, Prof. Dr. Erich.** *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*. 2. Auflage. Renningen-Malmsheim : expert verlag, 1995.
4. **Schröder, Dierk.** *Elektrische Antriebe-Grundlagen*. München : Springer-Verlag, 2007.
5. **IPG Laser GmbH.** YTTERBIUM PULSED FIBER LASER SPECIFICATION MODELS. Burbach : IPG Laser GmbH, 2009. E27044 Rev.03..
6. **SCANLAB AG.** SCANcube 7,8.5,10,14. Puchheim : SCANLAB AG.
7. **isel Germany AG.** technische daten MD1. Dermbach : isel Germany AG, 2011.
8. **isel Germany AG.** allgemeine technische Daten. Dermbach : isel Germany AG, 2011.
9. **SCANLAB AG.** RTC 4 PC-Interfacekarte. Puchheim : SCANLAB AG, 2006. Rev. 1.3d.
10. **Nanotec Electronic GmbH & Co. KG.** Programmierhandbuch für Schrittmotorsteuerungen. Landsham : Nanotec Electronic GmbH & Co. KG, 2010. V2.4.
11. **Scheufler, Angela.** Die Rosinen raus gepickt. Servogeregelte Schrittmotoren mit integrierter Steuerung im geschlossenen Regelkreis. *Der Konstrukteur*. 12.07.2011, Sonderheft Antreiben-Steuern-Bewegen.

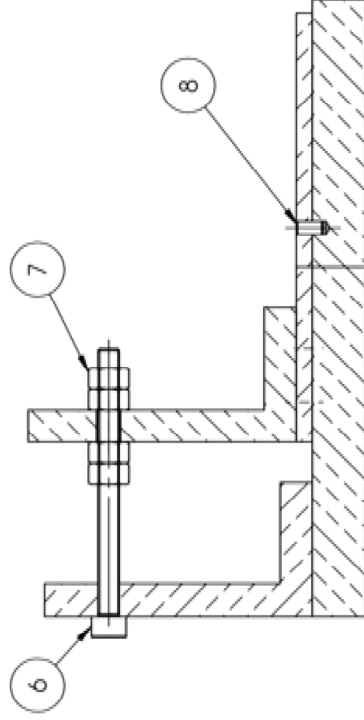
Anlagen

Teil 1 : Zeichnungen der Positioniereinrichtung	A-I
Teil 2 : Skripte zur Markierung von Geometrien	A-XI

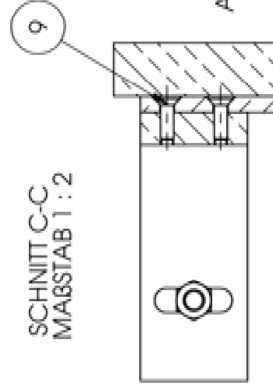
Anhang, Teil 1

Zeichnungen der Positioniervorrichtung

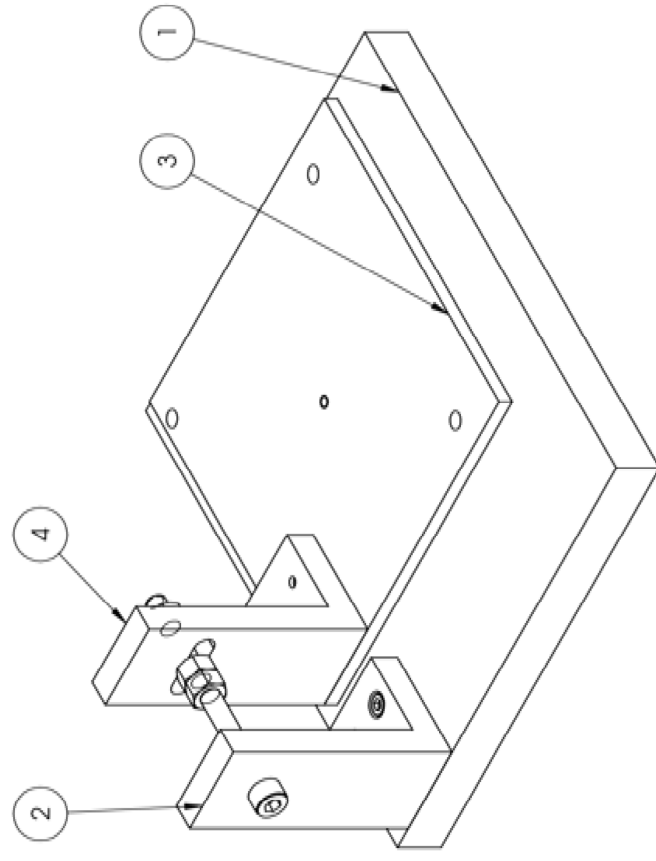
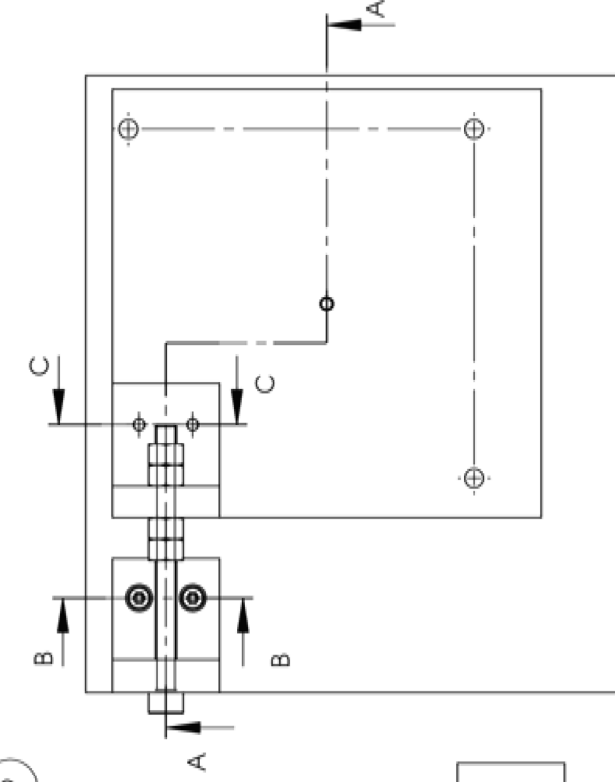
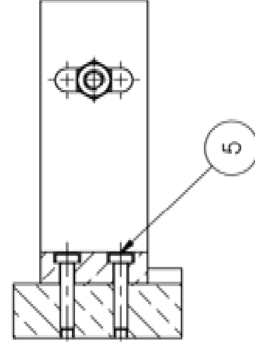
SCHNITT A-A
MAßSTAB 1:2



SCHNITT C-C
MAßSTAB 1:2



SCHNITT B-B
 MABSTAB 1 : 2

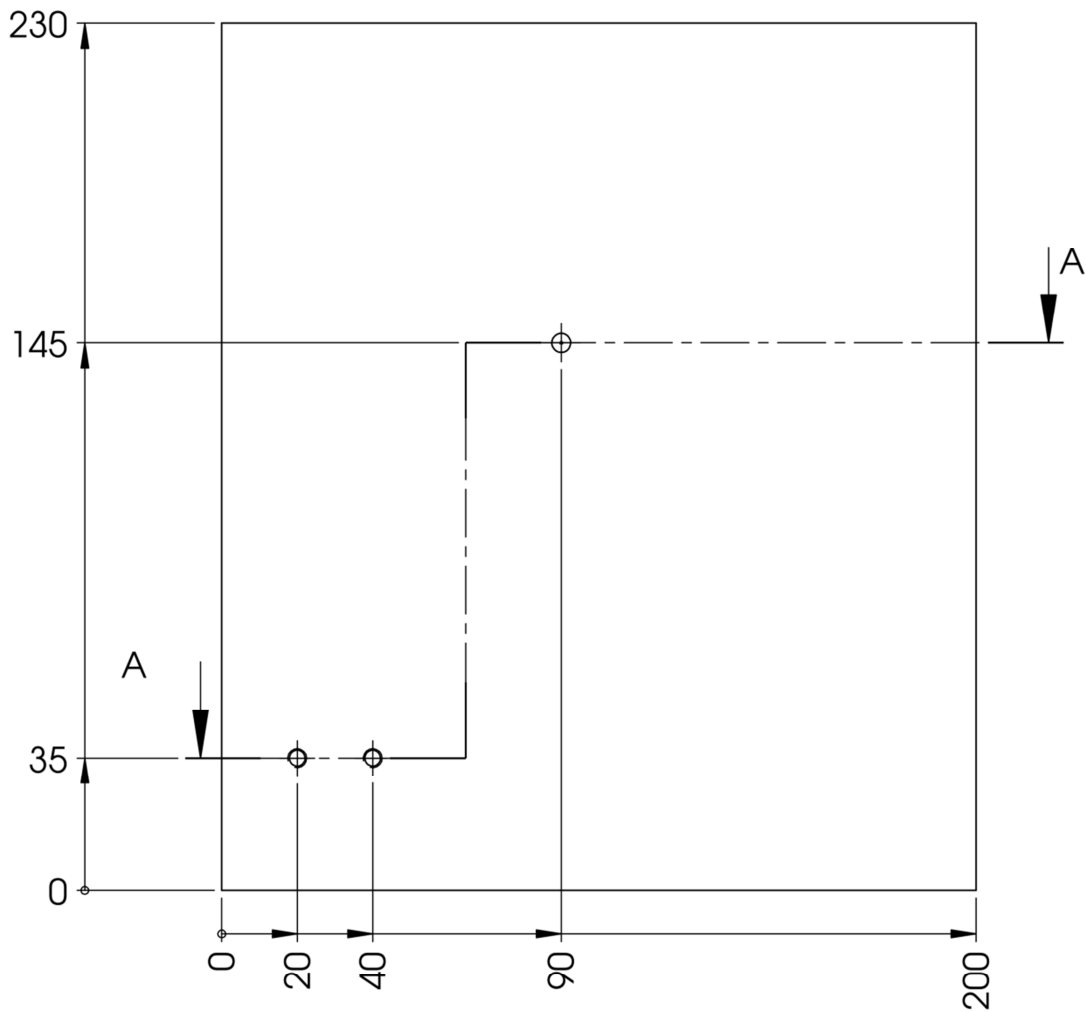
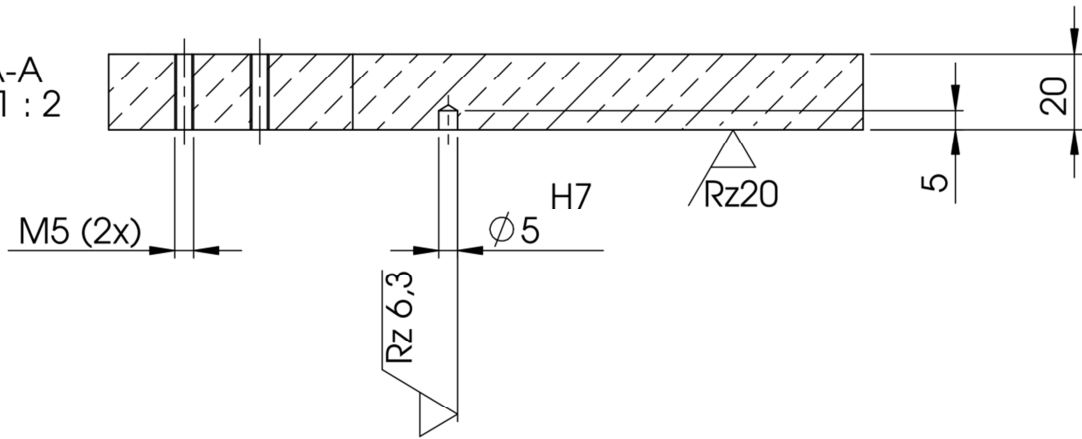


POS.-NR.	BENENNUNG	BESCHREIBUNG	MENGE
1	111118-01	Grundplatte	1
2	111118-02	Winkel 1	1
3	111118-03	Drehplatte	1
4	111118-04	Winkel 2	1
5	DIN 6912 - M5 x 25	Zylinderschraube mit Innensechskant	2
6	ISO 4762 - M8 x 80	Zylinderschraube mit Innensechskant	1
7	ISO 4034 - M8	Sechskantmutter	4
8	DIN 7-5x10	Zylinderstift	1
9	ISO 10642 - M5 x 16	Senkschraube mit Innensechskant	2

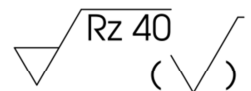
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMAßLUNGEN SIND IN MILLIMETER TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:			OBERFLÄCHENRUGE:			EINGESÄGEN UND SCHWÄRE KANTEN BRECHEN			ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ANMERKUNG	
									BENUTZUNG:			
NAME			SIGNATUR			DATUM			Positioniereinheit			
ZUSCHNEIT			Querschnitt			18.11.11						
GERÜST												
GERÄTEGZ												
PRODUKTION												
QUALITÄT									ZEICHNUNGSRG:			
									111118-00			
									A3			
									MASSSTAB 1:1			
									BLATT 1 VON 1			

Ausdruck nicht maßstabsgerecht

SCHNITT A-A
 MAßSTAB 1 : 2

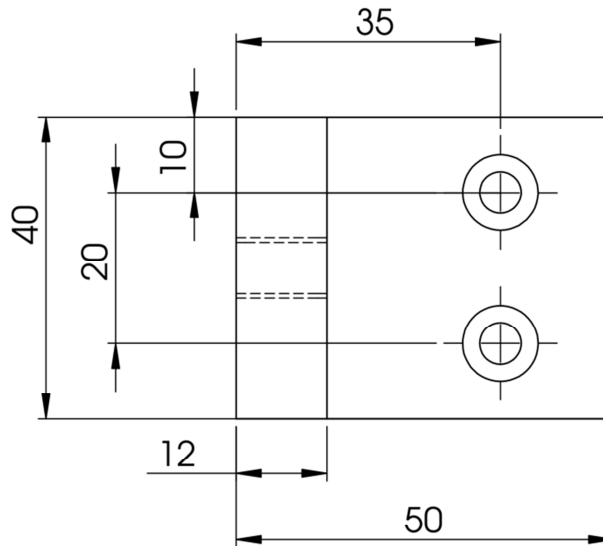
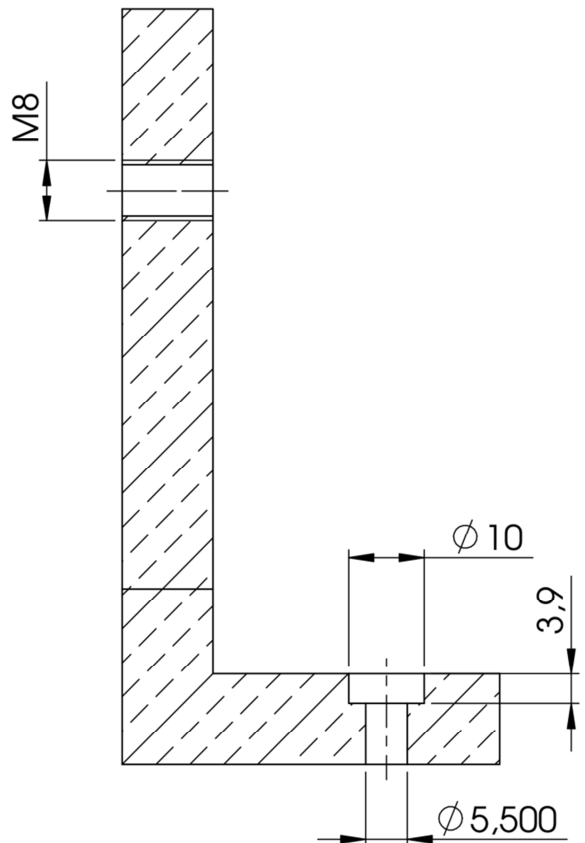
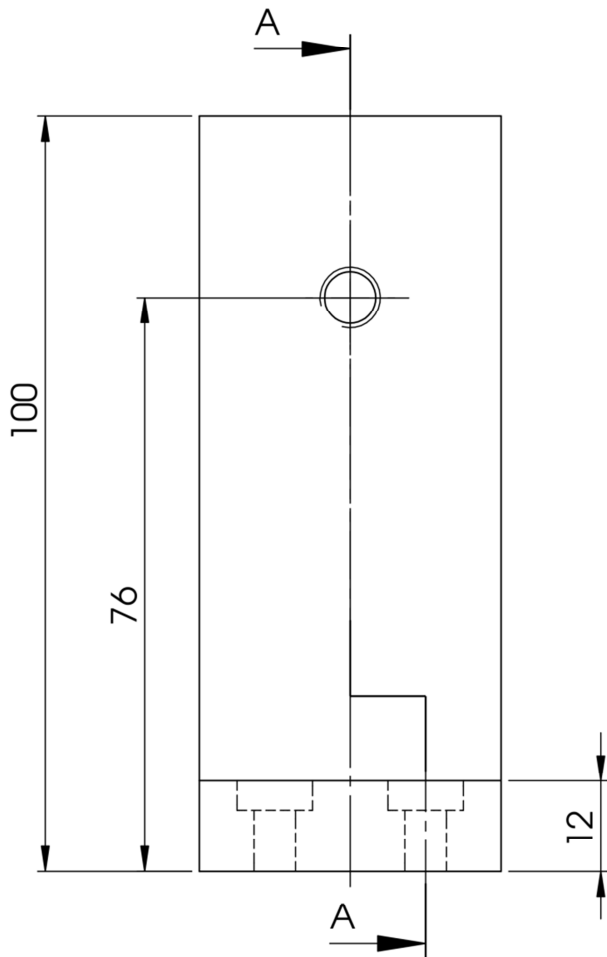


Alle untolerierten Bohrungen $\pm 0,2$
 Kanten gebrochen



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Quellmalz		18.11.11		Grundplatte			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				3.3535 (EN-AW 5754)		111118-01			
				GEWICHT:		MAßSTAB: 1:2		BLATT 1 VON 1	

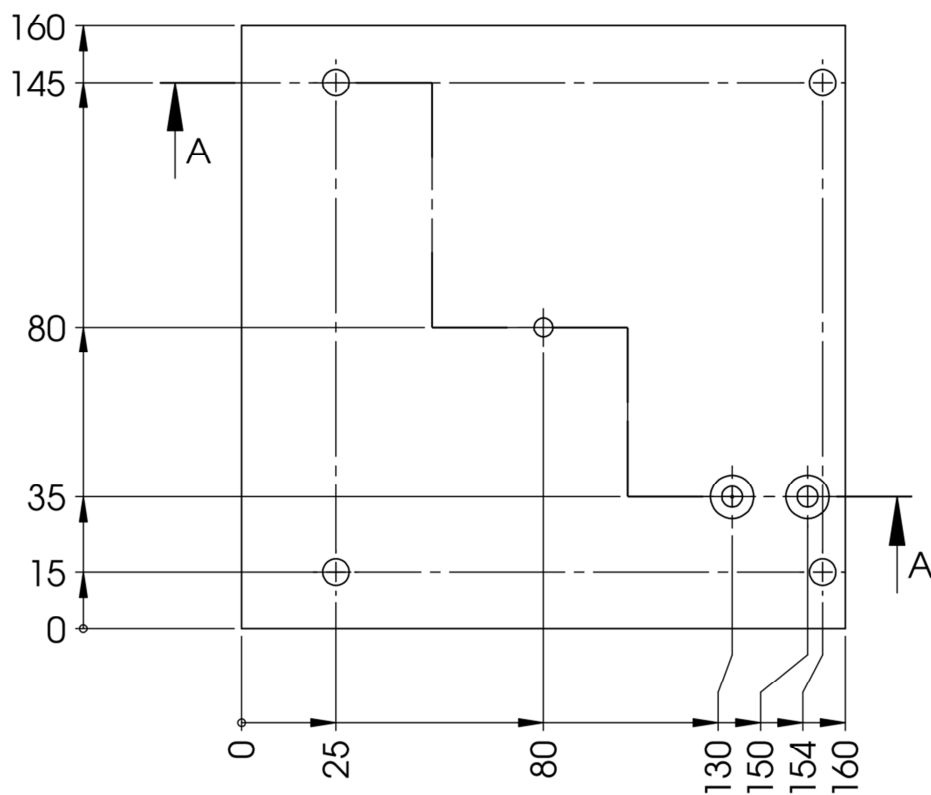
SCHNITT A-A



Alle untolerierten Bohrungsabstände $\pm 0,2$
Kanten gebrochen

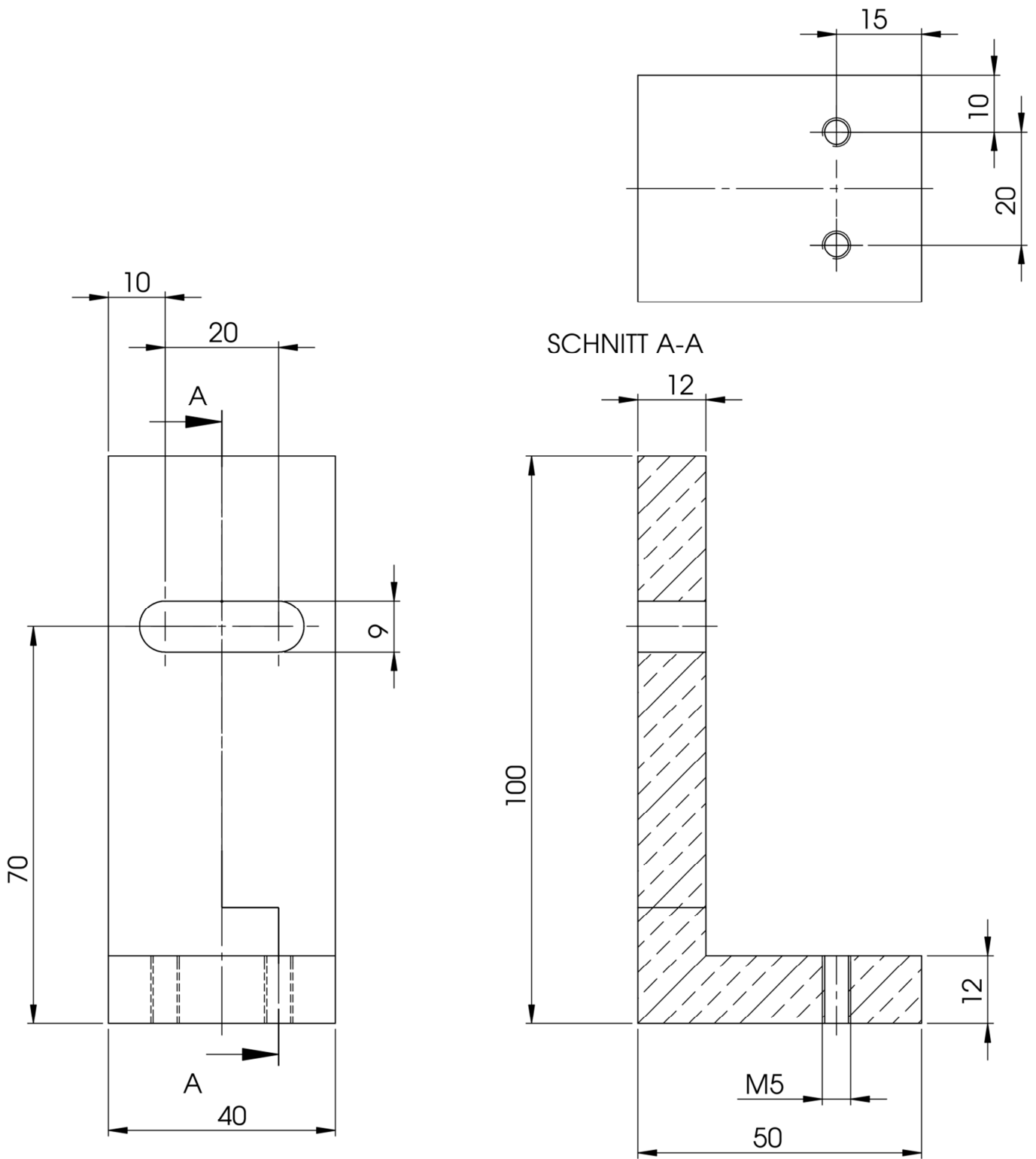
Rz 20 (✓)

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Quellmalz		18.11.11		Winkel 1			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				3.3535 (EN-AW 5754)		111118-02			
				GEWICHT:		MASSSTAB: 1 : 1		BLATT 1 VON 1	



$\sqrt{Rz \ 20}$ (✓)

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:				ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN				ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN				ÄNDERUNG					
		NAME		SIGNATUR		DATUM								BENENNUNG: <div>Drehplatte</div>							
GEZEICHNET		Quellmalz				18.11.11															
GEPRÜFT																					
GENEHMIGT																					
PRODUKTION																					
QUALITÄT								WERKSTOFF: 3.3535 (EN-AW 5754)						ZEICHNUNGSNR. 111118-03						A4	
								GEWICHT:						MASSSTAB:1:2				BLATT 1 VON 1			



alle untolerierten Bohrungsabstände $\pm 0,2$
Kanten gebrochen

Rz20 (✓)

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:			ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN			ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN			ÄNDERUNG	
	NAME	SIGNATUR	DATUM				BENENNUNG: Winkel 2							
GEZEICHNET	Quellmalz		18.11.11											
GEPRÜFT														
GENEHMIGT														
PRODUKTION														
QUALITÄT				WERKSTOFF: 3.3535 (EN-AW 5754)			ZEICHNUNGSNR. 111118-04					A4		
				GEWICHT:			MASSSTAB:1:1				BLATT 1 VON 1			

Anlagen, Teil 2

Skripte zur Markierung von Geometrien

Dreiecke

```
am z 134.6 // eingestellte z-Koordinate (Fokus auf Materialoberfläche)
power 1 // Laserleistung in %
freq 50 // Frequenz in kHz

shift 0 11

beginmark
rtc sync 0

int n_Element // Zählvariable
float f_x1 // x-Koordinate des Punktes 1 des Dreiecks
float f_y1 // y-Koordinate des Punktes 1 des Dreiecks
float f_x2 // x-Koordinate des Punktes 2 des Dreiecks
float f_y2 // y-Koordinate des Punktes 2 des Dreiecks
float f_x3 // x-Koordinate des Punktes 3 des Dreiecks
float f_y3 // y-Koordinate des Punktes 3 des Dreiecks

float f_dxn // Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten in x-
Richtung
float f_dyn // Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten in
x-Richtung

float f_pi 3.141592654 // die Zahl pi

float f_D_Bauteil // Durchmesser des Bauteils (in mm)
float f_Umfang_Bauteil // Umfang des Bauteils (in mm)
float f_Drehzahl // Drehzahl der Rotationsachse (in min-1)
float f_winkelgeschwindigkeit // Winkelgeschwindigkeit der Rotationsachse
(in °/s)
float f_winkelbeschleunigung // Beschleunigung der Rotationsachse

float f_drehwinkel // Winkel um dem sich im jeweiligen Moment die Achse
drehen soll
float f_drehwinkel_davor // Drehwinkel beim vorhergehenden Vektor
float f_t_B // Beschleunigungszeit
float f_Beschleunigungswinkel // Winkel, der in der Beschleunigungszeit
zurückgelegt wird
int n_Beschleunigungszeit // Zeit die die Achse zum beschleunigen
benötigt (in ms)
// empirisch ermittelter Korrekturwert für die Beschleunigungszeit
float f_const1 0.99549313
float f_const2 -12.0475369
float f_const3 0.00594975

float f_Geschwindigkeit_Scanner // Markiergeschwindigkeit des Scanners
//für die Strecke zwischen 2 Punkten (in mm/s)

float f_drehwinkel_vor // gibt den Winkel an um den sich die Achse bei
//der Markierung des vorhergehenden Vektors gedreht hat
```

```
bool b_gleich // zeigt an ob die Variable mit dem Vergleichswert
               identisch ist

bool b_gleiche_Richtung // gibt an ob sich die Achse in die selbe
//Richtung drehen soll wie beim vorhergehenden Vektor
bool b_pos_Drehrichtung // gibt an ob sich die Achse in positiver
//Drehrichtung bewegen soll
bool b_pos_Drehrichtung_vorher // gibt an ob sich die Achse beim
//vorhergehenden Vektor in positiver Drehrichtung bewegt hat

float f_Geschwindigkeit_Achse // gib die radialgeschwindigkeit der Achse
                               auf dem Bauteilumfang an

// Hilfsvariablen für Berechnungen
float f_hilf
float f_hilf2
float f_hilf3

// Setzen der bekannten Variablen

set f_x1 0
set f_y1 0
set f_x2 15
set f_y2 25
set f_x3 20
set f_y3 20

set f_D_Bauteil 24
set f_Drehzahl 10
set f_winkelbeschleunigung 900

//Berechnung winkelgeschwindigkeit

    set f_winkelgeschwindigkeit f_Drehzahl
    mul f_winkelgeschwindigkeit 360
    div f_winkelgeschwindigkeit 60

//Berechnung des Bauteilumfanges

    set f_Umfang_Bauteil f_D_Bauteil
    mul f_Umfang_Bauteil f_pi

axis r setvel f_winkelgeschwindigkeit
axis r setramp f_winkelbeschleunigung

//Berechnung Beschleunigungsszeit

set f_t_B f_winkelgeschwindigkeit
div f_t_B f_winkelbeschleunigung

mul f_t_B f_const1
set f_hilf f_const2
div f_hilf f_winkelbeschleunigung
add f_hilf f_t_B
add f_hilf f_const3
mul f_hilf 1000

// f_hilf
```

```
toint n_beschleunigungszeit f_hilf

// Berechnung Beschleunigungswinkel

pow f_Beschleunigungswinkel f_t_B 2
mul f_Beschleunigungswinkel f_winkelbeschleunigung
div f_Beschleunigungswinkel 2

//disp f_Beschleunigungswinkel

//rtc gotoxy f_x1 0

rtc loadlist 1
m f_x1 0
flush move
rtc endlist

rtc execlist 1

sleep 500

loop n_Element 1 3

    //disp n_Element
    gosub BEARBEITE_ELEMENT

endloop

subroutine BEARBEITE_ELEMENT

// Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten in x- und in y-Richtung
berechnen
cmpeq n_Element 1 b_gleich

ifnot b_gleich
then cmpeq n_Element 4 b_gleich

if b_gleich
then set f_dxn f_x2

if b_gleich
then sub f_dxn f_x1

if b_gleich
then set f_dyn f_y2

if b_gleich
then sub f_dyn f_y1

cmpeq n_Element 2 b_gleich

if b_gleich
then set f_dxn f_x3
```

```
if b_gleich
then sub f_dxn f_x2

if b_gleich
then set f_dyn f_y3

if b_gleich
then sub f_dyn f_y2

cmpeq n_Element 3 b_gleich

if b_gleich
then set f_dxn f_x1

if b_gleich
then sub f_dxn f_x3

if b_gleich
then set f_dyn f_y1

if b_gleich
then sub f_dyn f_y3

// Berechnung Markiergeschwindigkeit und resultierende Geschwindigkeit

set f_Geschwindigkeit_Scanner f_winkelgeschwindigkeit
mul f_Geschwindigkeit_Scanner f_Umfang_Bauteil
div f_Geschwindigkeit_Scanner 360

set f_Geschwindigkeit_Achse f_Geschwindigkeit_Scanner

set f_hilf f_dxn
div f_hilf f_dyn

abs f_hilf

mul f_Geschwindigkeit_Scanner f_hilf

pow f_hilf f_Geschwindigkeit_Scanner 2
pow f_hilf2 f_Geschwindigkeit_Achse 2

add f_hilf2 f_hilf

pow f_hilf3 f_hilf2 0.5

dump f_hilf3

// Berechnung Drehwinkel

set f_drehwinkel_vor f_drehwinkel
cmpgt f_drehwinkel_vor 0 b_pos_Drehrichtung_vorher

set f_drehwinkel f_dyn
div f_drehwinkel f_Umfang_Bauteil
mul f_drehwinkel 360

cmpgt f_drehwinkel 0 b_pos_Drehrichtung
```

```
set f_hilf f_Beschleunigungswinkel

mul f_hilf 2

if b_pos_Drehrichtung
then add f_drehwinkel f_hilf
else sub f_drehwinkel f_hilf

cmpeq b_pos_Drehrichtung b_pos_Drehrichtung_vorher b_gleiche_Richtung

if b_pos_Drehrichtung
then mul f_hilf -1

if b_gleiche_Richtung
then amr r f_hilf

// RTC laden

rtc loadlist 1

    markspeed f_Geschwindigkeit_Scanner

    dump n_beschleunigungszeit
    wait n_beschleunigungszeit

    drawrel f_dxn 0

    flush draw

rtc endlist

rtc selectlist 1 // Liste 1 ausgewählt für externen Start

rtc maxstarts 1 // 1 externen Start erlauben

rtc mode 1 // externen Start aktivieren

// Achse starten

    amr r f_drehwinkel

endsub
```

N-Ecke

```

shift -8 12.5
am z 136 // eingestellte z-Koordinate (Fokus auf Materialoberfläche)
power 1 // Laserleistung in %
freq 80 // Frequenz in kHz

beginmark
rtc sync 0

//benötigte Variablen
int n_Anzahl_Ecken // Anzahl der Ecken
float f_x_Mitte // x-Koordinate des Mittelpunktse
float f_y_Mitte // y-Koordinate des Mittelpunktse
float f_x_1 // x-Koordinate des ersten Eckpunktes
float f_y_1 // y-Koordinate des ersten Eckpunktes
float f_Zentriwinkel 360 // Winkel um den der Vektor zwischen Mittelpunkt
//und Eckpunkt gedreht wird, um einen neuen Eckpunkt zu berechnen
float f_x_i // x-Koordinate des i-ten Eckpunktes
float f_y_i // y-Koordinate des i-ten Eckpunktes
float f_x_i_1 // x-Koordinate des i-1-ten Eckpunktes
float f_y_i_1 // y-Koordinate des i-1-ten Eckpunktes
float f_x_i1 // x-Koordinate des i+1-ten Eckpunktes
float f_y_i1 // y-Koordinate des i+1-ten Eckpunktes
int n_Element //Zählvariable
float f_x_hilf // Hilfsvariable
float f_y_hilf // Hilfsvariable
float f_cos // Variable in der der Kosinus eines Winkels abgespeichert
                wird
float f_sin // Variable in der der Kosinus eines Winkels abgespeichert
                wird
float f_x_MP_i_1 // Abstand in x-Richtung zwischen Mitte und i-1-ten
                Eckpunkt
float f_y_MP_i_1 // Abstand in y-Richtung zwischen Mitte und i-1-ten
                Eckpunkt
float f_x_MP_i // Abstand in x-Richtung zwischen Mitte und i+1-ten
                Eckpunkt
float f_y_MP_i // Abstand in y-Richtung zwischen Mitte und i+1-ten
                Eckpunkt

float f_dx_i // Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten in
                x-Richtung
float f_dy_i // Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten in
                y-Richtung

float f_D_Bauteil // Durchmesser des Bauteils (in mm)
float f_Umfang_Bauteil // Umfang des Bauteils (in mm)
float f_Drehzahl // Drehzahl der Rotationsachse (in min-1)
float f_winkelgeschwindigkeit // Winkelgeschwindigkeit der
                Rotationsachse (in °/s)
float f_winkelbeschleunigung // Beschleunigung der Rotationsachse

float f_drehwinkel // Winkel um dem sich im jeweiligen Moment die Achse
                drehen soll
float f_drehwinkel_vor // Winkel um den sich die Achse beim
                vorhergehenden Vektor gedreht hat

```

```
float f_Geschwindigkeit_Scanner // Markiergeschwindigkeit des Scanners
//für die Strecke zwischen 2 Punkten (in mm/s)

float f_pi 3.151592654 // Zahl pi

bool b_pos_Drehrichtung // gibt an ob sich die Achse in positive
                        Richtung drehen soll
bool b_pos_Drehrichtung_vorher // gibt an ob die Achse beim
//vorhergehenden Vektor in positive Richtung gedreht wurde
bool b_gleiche_Richtung // gibt an ob sich die Achse in die selbe
                        Richtung weiter drehen soll

float f_t_B // beschleunigungszeit in s
int n_beschleunigungszeit // Beschleunigungszeit in ms
float f_const 11.0985728291033 // empirisch ermittelter Korrekturwert
                        für die Beschleunigungszeit
float f_Beschleunigungswinkel // Winkel der während der Beschleunigung
                        zurückgelegt wurde

string str_disp // Variable zur ausgabe von Fehlermeldungen

float f_Geschwindigkeit_Achse // Radialgeschwindigkeit der
                        Rotationsachse auf dem Bauteilumfang

// Hilfsvariablen für Berechnungen
float f_hilf
float f_hilf2
float f_hilf3

// setzen der Variablen

set n_Anzahl_Ecken 40
set f_x_Mitte 10
set f_y_Mitte 5

set f_x_1 5

set f_y_1 5

set f_D_Bauteil 27.2
set f_Drehzahl 10
set f_winkelbeschleunigung 900

//Berechnung winkelgeschwindigkeit

set f_winkelgeschwindigkeit f_drehzahl
mul f_winkelgeschwindigkeit 360
div f_winkelgeschwindigkeit 60

//Berechnung des Bauteilumfanges

set f_Umfang_Bauteil f_D_Bauteil
mul f_Umfang_Bauteil f_pi

//Berechnung Beschleunigungszeit

set f_t_B f_winkelgeschwindigkeit
```

```
div f_t_B f_winkelbeschleunigung

set f_hilf f_const
div f_hilf f_winkelbeschleunigung
sub f_hilf f_t_B
mul f_hilf -1000

toint n_beschleunigungszeit f_hilf

// Berechnung Beschleunigungswinkel

pow f_Beschleunigungswinkel f_t_B 2
mul f_Beschleunigungswinkel f_winkelbeschleunigung
div f_Beschleunigungswinkel 2

disp f_Beschleunigungswinkel

// Berechnung vom Zentriwinkel

div f_Zentriwinkel n_Anzahl_Ecken

// Berechnung der Eckpunkte

sin f_sin f_Zentriwinkel
cos f_cos f_Zentriwinkel

set f_x_i_1 f_x_1
set f_y_i_1 f_y_1

// Berechnung Abstand des i-1-ten Punktes zum Mittelpunkt
set f_x_MP_i_1 f_x_i_1
sub f_x_MP_i_1 f_x_Mitte

set f_y_MP_i_1 f_y_i_1
sub f_y_MP_i_1 f_y_Mitte

// Berechnung x-Koordinate des i-ten Punktes
set f_x_hilf f_x_MP_i_1
mul f_x_hilf f_cos

set f_y_hilf f_y_MP_i_1
mul f_y_hilf f_sin

set f_x_i f_x_Mitte
add f_x_i f_x_hilf
sub f_x_i f_y_hilf

// Berechnung y-Koordinate des i-ten Punktes
set f_x_hilf f_x_MP_i_1
mul f_x_hilf f_sin

set f_y_hilf f_y_MP_i_1
mul f_y_hilf f_cos

set f_y_i f_y_Mitte
add f_y_i f_x_hilf
```



```
    add f_y_i f_y_hilf

axis r setvel f_winkelgeschwindigkeit
axis r setramp f_winkelbeschleunigung

rtc loadlist 1
m f_x_1 0
flush move
rtc endlist

rtc execlist 1

sleep 500

loop n_Element 1 n_Anzahl_Ecken

disp n_Element
gosub BEARBEITE_ELEMENT

endloop

subroutine BEARBEITE_ELEMENT

    // Berechnung Abstand des i-1-ten Punktes zum Mittelpunkt
    set f_x_MP_i f_x_i
    sub f_x_MP_i f_x_Mitte

    set f_y_MP_i f_y_i
    sub f_y_MP_i f_y_Mitte

    // Berechnung x-Koordinate des i-ten Punktes
    set f_x_hilf f_x_MP_i
    mul f_x_hilf f_cos

    set f_y_hilf f_y_MP_i
    mul f_y_hilf f_sin

    set f_x_i1 f_x_Mitte
    add f_x_i1 f_x_hilf
    sub f_x_i1 f_y_hilf

    // Berechnung y-Koordinate des i-ten Punktes
    set f_x_hilf f_x_MP_i
    mul f_x_hilf f_sin

    set f_y_hilf f_y_MP_i
    mul f_y_hilf f_cos

    set f_y_i1 f_y_Mitte
    add f_y_i1 f_x_hilf
    add f_y_i1 f_y_hilf

    //Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten in x- und y-Richtung
```

```
set f_dx_i f_x_i
sub f_dx_i f_x_i_1

set f_dy_i f_y_i
sub f_dy_i f_y_i_1

// Berechnung Markiergeschwindigkeit

set f_Geschwindigkeit_Scanner f_winkelgeschwindigkeit
mul f_Geschwindigkeit_Scanner f_Umfang_Bauteil
div f_Geschwindigkeit_Scanner 360

set f_Geschwindigkeit_Achse f_Geschwindigkeit_Scanner

set f_hilf f_dx_i
div f_hilf f_dy_i

abs f_hilf

mul f_Geschwindigkeit_Scanner f_hilf
pow f_hilf f_Geschwindigkeit_Scanner 2
pow f_hilf2 f_Geschwindigkeit_Achse 2

add f_hilf2 f_hilf

pow f_hilf3 f_hilf2 0.5

dump f_hilf3

// Berechnung Drehwinkel

set f_drehwinkel_vor f_drehwinkel
cmpgt f_drehwinkel_vor 0 b_pos_Drehrichtung_vorher

set f_drehwinkel f_dy_i
div f_drehwinkel f_Umfang_Bauteil
mul f_drehwinkel 360

cmpgt f_drehwinkel 0 b_pos_Drehrichtung

set f_hilf f_Beschleunigungswinkel

mul f_hilf 2

if b_pos_Drehrichtung
then add f_drehwinkel f_hilf
else sub f_drehwinkel f_hilf

cmpeq b_pos_Drehrichtung b_pos_Drehrichtung_vorher b_gleiche_Richtung

if b_pos_Drehrichtung
then mul f_hilf -1

if b_gleiche_Richtung
```

```
then amr r f_hilf

// RTC laden

rtc loadlist 1

    markspeed f_Geschwindigkeit_Scanner
    wait n_beschleunigungszeit

    drawrel f_dx_i 0

flush draw

rtc endlist

rtc selectlist 1 // Liste 1 ausgewählt für externen Start

rtc mode 1 // externen Start aktivieren

// Achse starten

amr r f_drehwinkel

// Vorbereitung für nächsten Vektor

set f_x_i_1 f_x_i

set f_y_i_1 f_y_i

set f_x_i f_x_i1

set f_y_i f_y_i1

endsub
```


Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 23.11.2011

Dana Quellmalz